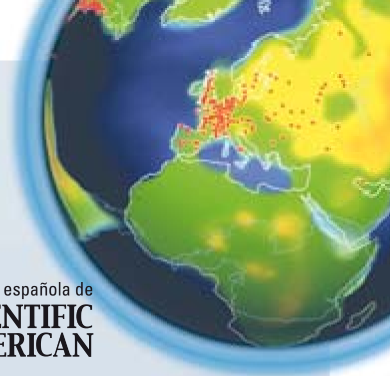
JULIO 2010



INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

FISICA
¿Cómo se definirá el kilogramo?

ECOLOGIA
Cambio climático y vegetación ártica

NEUROCIENCIA
Ciegos con visión inconsciente

ASTRONOMIA
Los neutrinos revelan fenómenos insondables

www.investigacionyciencia.es

6,00 EUROS

CELULAS PLURIPOTENTES

El poder terapéutico de las células madre inducidas



SUMARIO

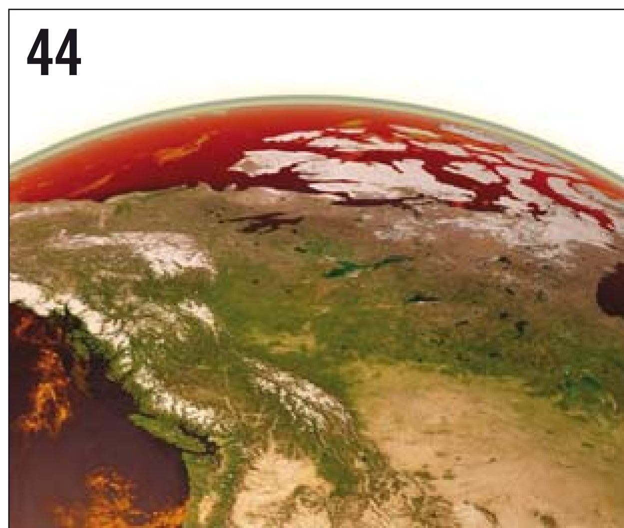
Julio de 2010/ Número 406



La detección de neutrinos cósmicos abre nuevas posibilidades en astronomía.

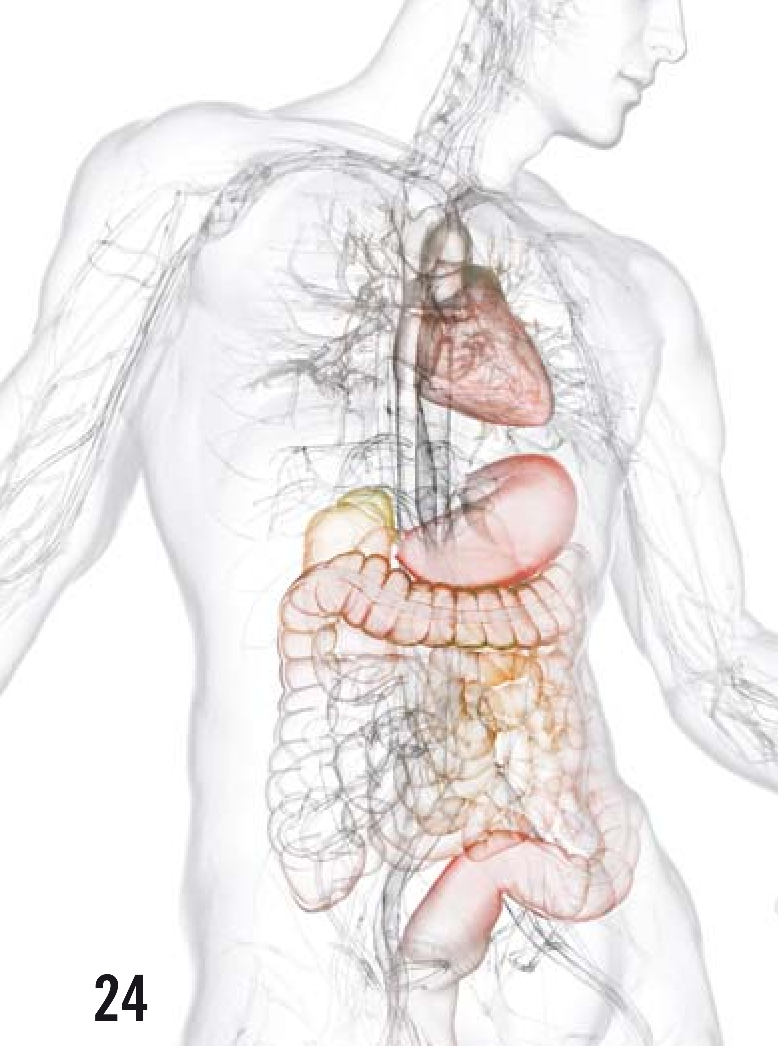


La “visión ciega” permite reaccionar ante expresiones faciales y esquivar obstáculos.



Con el cambio climático, ciertas regiones del Artico están reverdeciendo y otras pardeando.

ARTICULOS



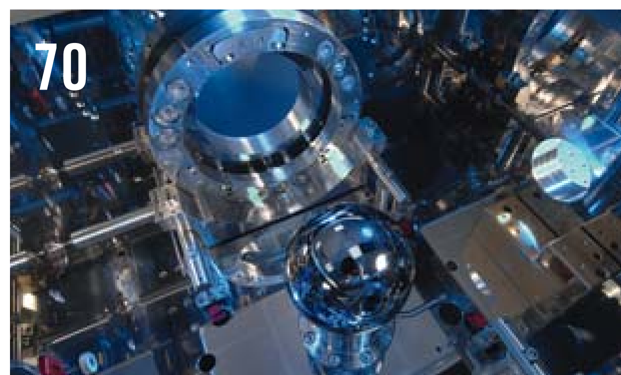
24

Las células maduras pueden manipularse para que pierdan la identidad y regresen a un estado embrionario.



62

Según la hipótesis geodésica, la semejanza entre floras de dos lugares es función inversa de la distancia entre ellos.



70

Fijar las constantes de la naturaleza permitiría redefinir las unidades de medida.

SECCIONES

INVESTIGACION
Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
COORDINADORA DE EDICIONES Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza
Ernesto Lozano Tellechea
Yvonne Buchholz
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
CHIEF NEWS EDITOR Philip M. Yam
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Davide Castelvecchi, Graham P. Collins, Mark Fischetti, Steve Mirsky, Michael Moyer, George Musser, Christine Soares, Kate Wong
CONTRIBUTING EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Stuart F. Brown, W. Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, Christie Nicholson, Michelle Press, John Rennie, Michael Shermer, Sarah Simpson
ART DIRECTOR Edward Bell
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
VICE PRESIDENT, OPERATIONS AND ADMINISTRATION Frances Newburg
VICE PRESIDENT, FINANCE AND BUSINESS DEVELOPMENT Michael Florek

DISTRIBUCION
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid) - Teléfono 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Teresa Martí Marco
Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

M.ª Rosa Zapatero Osorio: *Neutrinos para observar el cosmos*; Juan Manuel González Mañas: *El poder terapéutico de nuestras células*; Luis Bou: *Ciegos con visión* y *Ciencia y sociedad*; Joandomènec Ros: *Calentamiento y vegetación ártica*; Rodomiro Ortiz: *Yuca mejorada contra el hambre*; Tanja Sachse: *Revisión del Sistema Internacional de Unidades*; Ernesto Lozano Tellechea: *Campos magnéticos cósmicos*; J. Vilardell: *Hace...*; Bruno Moreno: *Apuntes*; Marián Beltrán: *Desarrollo sostenible*; Teodoro Vives: *Taller y laboratorio*



Portada: Bryan Christie Design

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	100,00 euro	190,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Printer Industria Gráfica Ctra. N-II, km 600 - 08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



Alimentar al mundo

Por mi experiencia de agricultora, sé que la información dada en "Biocarburantes celulósicos" de George W. Huber y Bruce E. Dale (septiembre 2009) acerca de los residuos agrícolas es falsa por el lado más peligroso. No sobran residuos de la cosecha de maíz. Desde luego, se pueden separar y utilizar para producir combustible. Pero ese residuo tiene forzosamente que permanecer en el lugar donde cae para que el suelo se renueve. Se necesita todo eso y más para mantener los niveles, ya de por sí bajos, de materia orgánica que han creado los años de arado y otras prácticas agrícolas insostenibles. El suelo puede morir, y de hecho muere, queda inútil para la producción de alimentos. La creación de energía es importante, pero también lo es la capacidad de alimentar a la humanidad.

Camilla Florence Coers
Charlotte, Carolina del Norte

RESPONDEN LOS AUTORES: *Durante la producción de biocarburantes se realizan toda clase de esfuerzos por elevar la fertilidad del suelo. Por fortuna, es posible separar residuos vegetales para obtener biocombustibles al tiempo que se abona el suelo. La materia orgánica, por ejemplo, puede recuperarse mediante la reducción de las prácticas de laboreo, la aplicación de plantaciones dobles (se plantan de forma sucesiva en la misma estación dos variedades de la planta para recoger doble cosecha) y cultivos de cobertura (que rellenan el suelo). En la página web del laboratorio de Dale (www.everythingbiomass.org) se detalla el modo en que algunas de estas prácticas permiten producir biocarburantes y a la vez fertilizar el suelo.*

¿El primer computador?

En "El origen de la computación" (noviembre de 2009), Martin Campbell-Kelly escribe que el primer computador digital fue el ENIAC, que J. Presper Eckert y John W. Mauchly terminaron de construir en 1945 como parte del esfuerzo bélico. Pero la primera persona que construyó e hizo funcionar una computadora digital electrónica fue un profesor de física, como bien aclara "El computador del Dr. Atanasoff", publicado en octubre de 1988 en *Investigación y Ciencia*. El primer computador de John Vincent Atanasoff era una máquina a 12 bits de dos palabras que funcionaba con la frecuencia de la red eléctrica (60 hertz) y podía sumar y restar cantidades binarias almacenadas en una unidad lógica compuesta de siete tubos tríodo. Esto ocurrió en 1937, sin guerras, antes de Pearl Harbor, nada más que por el empeño de un físico teórico en resolver problemas de mecánica cuántica con sus alumnos del Iowa State College de Ames, Iowa.

John Hauptmann
Departamento de Física
Universidad del Estado de Iowa

En el caso Honeywell contra Sperry Rand, uno de los procesos más largos —casi cinco años— de la historia de los tribunales federales estadounidenses, el juez Earl R. Larson dictaminó en 1973 que la patente de Eckert y Mauchly por el ENIAC no era válida. Dicho juez declaró que Eckert y Mauchly "no inventaron el computador automático digital electrónico, sino que derivaron el concepto en cuestión de un tal Dr. John Vincent Atanasoff".

Edward B. Watters
Newberg, Oregón

CAMPBELL-KELLY RESPONDE: *En la historia de la computación se ha de tener cautela en la asignación de prioridades a los inventores. Yo no dije que Eckert y Mauchly inventaran el computador electrónico, sino que inventaron un determinado computador, el ENIAC. También afirmé que "el ENIAC supuso la entrada de la computación en la era electrónica", lo que es cierto por lo que se refiere a los instrumentos de computación prácticos y de aplicación muy amplia.*

Durante la II Guerra Mundial hubo varios proyectos de computación electrónica, tanto anteriores al ENIAC como contemporáneos suyos, y uno de ellos fue la máquina de Atanasoff; entre otros figuran las máquinas descifradoras de NCR, el computador Zuse Z4 en Alemania y el computador Colossus para descifrados, del Reino Unido. En un breve artículo no podía reseñarlos todos. La máquina de Atanasoff fue una computadora poco conocida, que valía sólo para una clase de problemas concreta, que no era programable y nunca funcionó plenamente.

Atanasoff detuvo en 1942 el desarrollo de su máquina, que permaneció en la oscuridad hasta 1971, fecha en que Honeywell se querelló contra Sperry Rand con el objeto de invalidar la patente del ENIAC. Durante el juicio se supo que Mauchly había visitado a Atanasoff y vio su computador en junio de 1941. No podemos averiguar qué aprendió en tal visita. Mauchly, no obstante, alegó que no sacó de ella "ideas de ningún tipo". El juez concedió a Atanasoff la prioridad de la invención, pero esta conclusión legal sorprendió a muchos historiadores.


EL ENIAC consumía una potencia equivalente a 1000 ordenadores modernos.

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

...cincuenta años

Mortalidad infantil. «Tras una larga caída en picado, la mortalidad entre los niños estadounidenses menores de un año se ha estabilizado en los últimos años, según un estudio de Iwao M. Moriyama, del Departamento Nacional de Estadísticas Vitales. En algunos estados incluso ha aumentado ligeramente, tras alcanzar un mínimo récord de 26 por cada 1000 nacidos vivos. El descenso de la mortalidad es atribuible en gran medida al control de enfermedades infecciosas como la gripe y la neumonía. En 1946, cuando la penicilina se hizo accesible para la población, los decesos por enfermedades infecciosas disminuyeron alrededor de un 30 por ciento. Sin embargo, esas patologías siguen siendo responsables de la mitad de los fallecimientos en los niños de entre un mes y un año de edad. La mortalidad en los bebés de menor edad refleja el gran número de víctimas por enfermedades no infecciosas como las malformaciones congénitas, las lesiones durante el parto, la asfixia postnatal y los partos prematuros.»

...cien años

Elegancia aérea. «El hecho más importante demostrado en el encuentro aeronáutico de Rheims fue la incuestionable superioridad del monoplano. Su éxito debió proporcionar una especial satisfacción a los franceses. Estos parecen haberse dado cuenta de que si pudiera superarse su inherente fragilidad, en comparación con la robustez de la estructura en puente del biplano, ofrecería importantes ventajas en cuanto a simplicidad, disminución de la resistencia al avance y menor peso. Además, el monoplano resulta atractivo, no sólo por su forma y estructura, tan similares a las de las aves, sino también porque sus sencillas y gráciles líneas le confieren un valor artístico indudable. Ello supone una fuerte ventaja para los franceses, quienes dan tanta importancia a la estética.»

La amenaza de los cielos. «Con los rápidos avances que se registran en la navegación aérea, se hace sumamente necesario que el ejército considere en serio los procedimientos para contrarrestar la influencia de esas máquinas en futuras guerras. En la primavera de 1910, la Academia Militar del Noroeste adquirió dos Cadillac 30. Esos automóviles con chasis de serie están preparados para acomodar a cuatro cadetes y permiten montar una ametralladora rápida Colt sobre el motor (*véase la ilustración*). Esas armas automáticas, de calibre .30, presentan una cadencia de tiro de 480 disparos por minuto y un alcance con mira de 1800 metros. Los resultados de las pruebas demuestran a las claras que la rapidez de tiro es tal que debemos contar con los automóviles militares como armas contra dirigibles y aeroplanos.»



AUTOMOVILES MILITARES: Armas contra la nueva amenaza aérea, 1910.

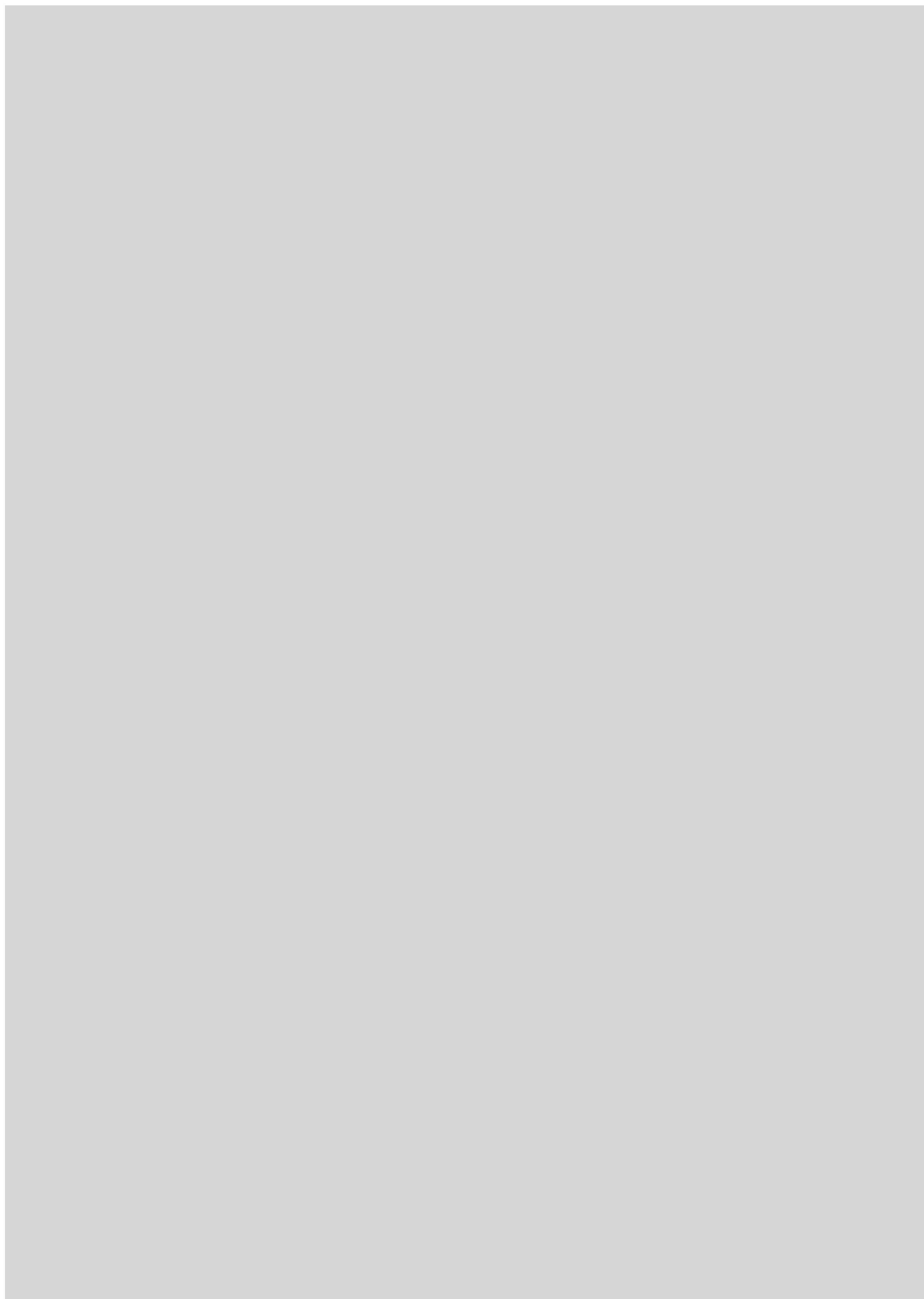
...ciento cincuenta años

Notas sobre enfermería. «Cuando vemos la natural y casi general ansia de los enfermos ingleses por su 'té' no podemos sino pensar en la sabiduría de la naturaleza. Un poco de té o café anima tanto a los pacientes como una cantidad más generosa; pero una buena cantidad de té, y sobre todo de café, afecta a su reducida capacidad digestiva. Sin embargo, al ver que una o dos tazas de té o café conforta a sus pacientes, la enfermera cree que tres o cuatro causarán un efecto doble. No es ni mucho menos así. Los únicos pacientes ingleses a los que hasta ahora he visto rechazar el té han sido casos de tifus, y el primer signo de mejora era que recuperaban su pasión por el té.

—Florence Nightingale.»

Cerveza rubia. «Miles de personas en Nueva York parecen haber olvidado por completo que el agua sirve de bebida. En ciertos barrios de la ciudad, la cerveza rubia ("lager") se ha convertido en un producto de primera necesidad: se vende en casi cada casa y constituye la bebida, e incluso la comida, de todos los hombres, mujeres y niños. ¡La cerveza rubia reina! La bebida forma parte de nuestras costumbres más modernas. Hace diez años significaba sólo una vulgar palabra alemana de importación desconocida; luego se consideró una insípida cerveza holandesa; pero al final una gran mayoría ha terminado aceptando que se trata del 'néctar del pueblo'. Ciertos testigos han declarado y los tribunales han decidido que la cerveza rubia *no* emborracha; pero en vista de que una pinta [aproximadamente medio litro] de esa cerveza contiene tanto alcohol como una copa normal de brandy, podría sospecharse que esos testigos se habrían permitido consumirla precisamente cuando se necesitaba de su sobriedad de juicio.»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CIII, N.º 5; 30 DE JULIO DE 1910



TABACO

Carcinógenos en el humo "de tercera mano"

Cualquier persona que entre en la vivienda de un fumador sabe que las huellas del tabaco no desaparecen cuando se apaga el cigarrillo. ¿Constituye un riesgo para la salud ese humo de tercera mano? Los investigadores del Laboratorio Nacional Lawrence en Berkeley han encontrado que el humo de los cigarrillos no se limita a posarse de forma inerte sobre las superficies. En lugar de ello, los restos de nicotina reaccionan con vapores de ácido nitroso, un compuesto bastante común en nuestro entorno que es emitido por electrodomésticos alimentados por gas, vehículos y otras fuentes. Esa reacción produce nitrosaminas específicas del tabaco (NAET), unas sustancias carcinógenas.



El humo de segunda mano ya contiene NAET, pero la presencia de ácido nitroso en el entorno puede hacer que su concentración aumente rápidamente en las horas posteriores al momento en que se fumó. Y, puesto que la nicotina permanece en las superficies durante semanas o meses, esta modalidad de exposición a sus efectos nocivos podría ser incluso más persistente que el humo de primera o segunda mano, ya que las NAET se inhalan, se ingieren y se absorben a través de la piel. Es probable que los niños constituyan la población más vulnerable al humo de tercera mano, al igual que sucede con el humo de segunda mano. Los resultados, publicados en línea en el número del 8 de febrero de *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, son todavía preliminares. Deberán realizarse investigaciones adicionales para determinar la toxicidad del humo de tercera mano.

—Katherine Harmon

ASTROFISICA

Estrellas imposibles

Una de las mayores incógnitas en astrofísica la constituye la formación de estrellas de gran masa. Según las teorías tradicionales, tales estrellas nunca hubieran podido nacer: la enorme cantidad de radiación emitida nada más "encenderse" debería vencer la atracción gravitatoria y dispersar la nube de polvo que alimenta su formación [*véase* "Formación estelar", por Erick T. Young; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 2010]. No obstante, es un hecho que tales estrellas existen. Pero son extremadamente escasas, por lo que su proceso de gestación siempre había eludido los ojos de los astrónomos.

Hace unas semanas, el Observatorio Espacial Herschel observó, por vez primera, una región de protoestrellas gigantes (de entre 8 y 10 masas solares) en pleno proceso de formación. Se detectaron en los bordes de dos regiones con gran abundancia de hidrógeno ionizado, resultado que parece apuntalar una de las propuestas teóricas que se habían adelantado para explicar la existencia de estos astros "imposibles".

—Agencia Espacial Europea

FISICA

¿Estallidos sónicos en la bañera?

En apariencia, un objeto duro que cae en una piscina hace que un chorro de aire salga tan rápidamente del agua que rompe, durante un breve instante, la barrera del sonido.

Físicos de la Universidad de Twente y de la Universidad de Sevilla diseñaron un experimento en el cual impulsaban un objeto con forma de disco, cuya parte plana golpeaba el agua a una velocidad, lenta, de un metro por segundo (equivalente a soltar el disco desde una altura de unos pocos centímetros). El disco desplazó el agua y creó una burbuja de aire en su estela, mientras se hundía.

Conforme el agua se iba cerrando alrededor para formar la burbuja, empujaba el aire hacia arriba a través de un pasaje de estrechamiento creciente, haciendo que el aire se acelerase. Era como si se cerrara una tobera diminuta, un fenómeno semejante al que ocurre en el motor de un cohete. Para rastrear el movimiento del aire, lo saturaron de pequeñas gotitas de glicerina producidas por una máquina de humo de las que se utilizan en las discotecas.



CHAPUZON SUPERSONICO: Un disco introducido en el agua por un pistón, a la velocidad de un metro por segundo, crea una burbuja que, al colapsarse, hace que el aire se mueva durante un breve instante a una velocidad superior a la del sonido.

Mediante una cámara de alta velocidad y simulaciones por ordenador, estimaron que el chorro de aire alcanzaba una velocidad máxima de 350 metros por segundo, es decir, algo superior a la velocidad del sonido. Los resultados aparecieron en un número reciente de *Physical Review Letters*. Aunque los detalles cambian para objetos de distintas formas y tamaños, el efecto físico es el mismo. Si dejamos caer una piedra en el agua, formaremos un chorro de aire supersónico.

—Davide Castelvecchi

NICK VEASEY *Getty Images* (*arriba*); DE "SUPERSONIC AIR FLOW DUE TO SOLID-LIQUID IMPACT," POR STEPHAN GEKLE, IVO R. PETERS, JOSE MANUEL GORDILLO, DEVARAJ VAN DER MEER Y DETLEF LOHSE, EN *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, VOL. 104; 15 DE ENERO DE 2010 (*abajo*)

EVOLUCION

Los humanos podrían haberse enfrentado a la extinción

Los hombres primitivos que vivieron hace alrededor de un millón de años estuvieron muy cerca de la extinción. Datos obtenidos mediante un nuevo enfoque genético, que explora regiones ancestrales del ADN, sugieren que la población de aquellas especies, entre las que se incluían *Homo erectus*, *H. ergaster* y *H. sapiens* arcaico, era de un máximo de 55.500 individuos.

Lynn Jorde, experto en genética humana de la Universidad de Utah, y sus colaboradores han llegado a esa conclusión tras examinar dos genomas de humano moderno completamente secuenciados, en busca de secuencias Alu, un tipo de elementos móviles que consisten en fragmentos cortos de ADN que se mueven entre distintas regiones del genoma. Estas secuencias se desplazan con una frecuencia tan baja que su presencia en una región sugiere que ésta es muy antigua. Debido a que las porciones más antiguas (con mayor contenido en secuencias Alu) han tenido tiempo para acumular más mutaciones, puede estimarse también la antigüedad de una región.

Asimismo, los científicos han comparado las secuencias de esas regiones más antiguas con la diversidad de los dos genomas. De ahí han deducido que el censo correspondiente a esa época ascendía a unos 55.500 individuos. (De hecho, los expertos en genética de poblaciones calculan el "tamaño de la población efectiva", un indicador de la diversidad genética que suele ser muy inferior a las cifras totales de población. En este caso, la población humana efectiva de hace 1,2 millones de años se estima en 18.000, cifra que Jorde ha utilizado para calcular la población total.) El trabajo se publicó en línea, en el número del 19 de enero de *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*.

Ese número tan pequeño resulta sorprendente, porque, según el registro fósil, en aquella época el género *Homo* se estaba expandiendo por Africa, Asia y Europa, lo cual sugiere que la población de homininos debía estar aumentando. Por tanto, debió producirse una gran catástrofe, tan devastadora como el supervolcán que se piensa que casi aniquiló a los humanos hace 70.000 años.

—*Carina Storrs*



LA FAMILIA HUMANA a lo largo del tiempo incluye (*de izquierda a derecha*) al *Homo heidelbergensis*, *erectus* y *neanderthalensis* (*fila superior*), y *erectus* y un *sapiens* arcaico (*fila central*). La fila inferior muestra tres *sapiens* actuales.

E. R. DEGGINGER *Photo Researchers, Inc.* (*cráneos*); PHOTO RESEARCHERS, INC. (*Spirit*)

MISIONES ESPACIALES

Un espíritu no muy libre

La sonda de exploración de Marte *Spirit*, cuya estancia en el Planeta Rojo alcanzó en enero su sexto aniversario, ya no volverá a recorrer la superficie marciana. Atrapada desde hace meses en Troya, una zona de terreno blando, ha sido designada "plataforma estacionaria de investigación".

Doug McCuistion, director del Programa de Exploración de Marte de la NASA, ha calificado la encrucijada en la que se encuentra la sonda como "la peor pesadilla de un golfista: la trampa de arena, de la que no puedes salir por muchos golpes que des".

Spirit perdió el uso de una de sus seis ruedas hace cuatro años y otra rueda se rompió durante sus recientes esfuerzos en Troya. Con sólo cuatro ruedas operativas, la extracción no ha dado fruto, explicó John Callas, jefe de proyecto para *Spirit* y su sonda gemela, *Opportunity*, en el Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA en Pasadena, California. Mientras tanto, la sonda *Opportunity* continúa valientemente con su misión desde su lugar de aterrizaje, al otro lado del planeta.

El primer desafío al que deberá enfrentarse *Spirit* consistirá en sobrevivir al largo y gélido invierno marciano, ya que la sonda no está bien situada para maximizar el aprovechamiento de energía solar durante el mismo. Y, sin la energía necesaria para mantener calientes sus componentes, *Spirit* podría sufrir un fallo electrónico definitivo. Callas estimó que las temperaturas podrían descender por debajo de los 40 grados centígrados bajo cero, acercándose así a los límites de las especificaciones operativas de la sonda.

Steve Squyres, de la Universidad de Cornell, investigador principal del proyecto, espera que *Spirit* sobreviva al frío y oscuro invierno que se aproxima. Si lo consigue, la primavera traerá numerosas oportunidades para que *Spirit* lleve a cabo investigaciones científicas en Marte.

—*John Matson*

SOBRE RUEDAS: En tiempos mejores, como durante esta extracción de muestras en 2004, la sonda *Spirit* exploró diferentes zonas de Marte.



La técnica de los batanes en España

En los batanes, ruedas hidráulicas verticales que accionaban unos mazos, se aprovechaba la energía del agua como fuerza motriz para tratar los paños

El estudio del patrimonio cultural ligado a la protoindustrialización ha revelado siempre datos muy curiosos sobre la aplicación de técnicas antiguas en el quehacer cotidiano de multitud de gentes en circunstancias muy diversas. La arqueología industrial se encarga de recuperar ese patrimonio, expuesto a la degradación y al olvido, para devolverlo a la sociedad en la que tanto tiempo estuvo trabajando. Para ello, se apoya en la memoria del trabajo (registros orales) y la cultura material (restos físicos del pasado).

Es fundamental disponer de testimonios de personas que trabajaron en centros productivos o que al menos dispusieron de información de primera mano de los mismos. Asimismo, encontrar restos físicos de su entorno posibilitaría realizar un estudio muy completo y recuperarlo, para que, por medio de las nuevas técnicas de ingeniería gráfica, se pueda obtener una recreación virtual o una herramienta que sirvan de ayuda durante la visita real al lugar. La historia de la técnica y la arqueología industrial se muestran íntimamente ligadas.

Funcionamiento

El batán es un ingenio de madera accionado por el agua que se utilizaba para golpear, desengrasar y enfurtir las telas de lana y hacerlas más fuertes y resistentes. Gracias al batán, se las podía lavar y batir durante al menos 24 horas, aunque la duración del proceso dependía de la temperatura del agua.

No es fácil precisar el origen del proceso de abatanado. Las fuentes históricas nos hablan de una práctica que ha pervivido hasta hace poco: las telas eran introducidas en un cajón, previamente humedecidas, y se las golpeaba con unos zuecos de madera, lo mismo que ocurría en el pisado de las aceitunas. En España, el origen de los batanes se ubica en Gerona, en 1166. Desde allí se extendió al resto del país. Se desarrolló una floreciente industria, sobre todo en Asturias y Galicia, según se desprende de la información obtenida en el catastro del Marqués de la Ensenada, a mediados del siglo XVIII.

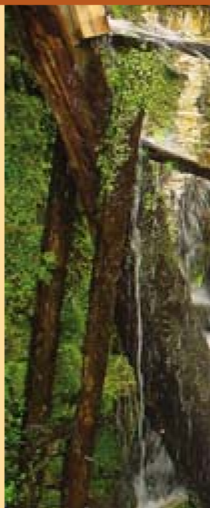
La rueda hidráulica, conocida en la época clásica, se aplicó como elemento motor en la Edad Media. El batán lle-

MAQUINAS HIDRAULICAS

Accionado por el agua, el batán se utilizaba para golpear, desengrasar y enfurtir las telas de lana. Se obtenían así paños más fuertes y resistentes. Una rueda hidráulica, el elemento motor, llevaba solidario un árbol de levas, que izaba los mazos (porros) para que golpeasen las telas introducidas en el cajón (imina). Los mazos estaban sujetos en el armazón del batán (potro). Las fotografías corresponden al conjunto etnográfico Os Teixois, en Asturias.





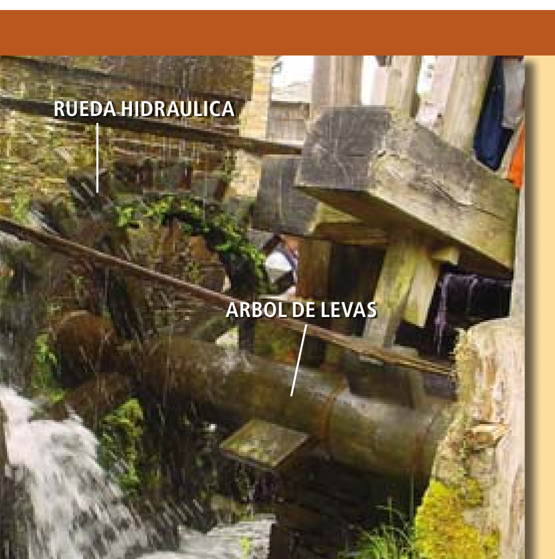


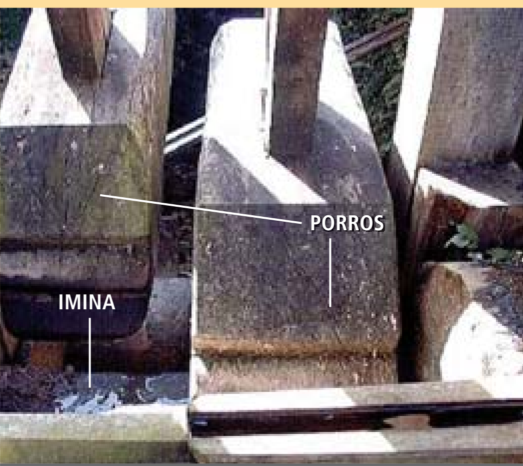


vaba solidario con la rueda un árbol de levas, que era el que izaba los mazos (porros), de unos 80 kg, para que golpeasen las telas introducidas en el cajón (imina). Los mazos estaban sujetos en el armazón del batán (potro), formado por cuatro pies apoyados en dos grandes vigas horizontales. Que se instalase una rueda hidráulica vertical (de eje horizontal) en vez de una horizontal (de eje vertical) dependía del caudal que tuviera el afluente. En sitios con gran caudal de agua era preferible acudir a la rueda hidráulica vertical. Las horizontales se instalaban en terrenos con escasez de agua, porque su regulación en estos casos era mucho mejor. En el norte de España, donde han abundado los batanes, había suficiente caudal, por lo que siempre se recurría a las ruedas hidráulicas verticales.

En la mayoría de los casos, el batán estaba compuesto de dos mazos que golpeaban las telas introducidas en zigzag en el cajón, con un desfase entre los mazos. El período en que volvían a golpear las telas dependía de la velocidad angular de la rueda. Una vez terminada la operación se sacaba la tela, que sufría una merma en su longitud, y se la golpeaba con una pala de madera sobre una gran piedra, para quitarle las arrugas.

FOTOGRAFIAS CORTESIA DE GONZALO MORIS-MENENDEZ VALDES





Algunos números

El agua podía llegarle a la rueda del mismo cauce del río o de una pequeña presa, desde la que se conducía el agua por medio de una canalización de sección cuadrada de unos 30 centímetros de lado y 4 metros de longitud, con cierta pendiente para que la energía potencial del agua se transformara en energía cinética y ésta, mediante la rueda, en energía mecánica.

La rueda hidráulica tenía por lo general un diámetro de 2,5 metros, con unas 20 palas de madera de castaño. El árbol de levas solidario a la rueda medía unos 4 metros de longitud y 40 centímetros de diámetro. Justo en su parte central había un par de levas, que izaban los dos mazos con un desfase entre ellas de 90 grados. Los extremos del eje terminaban en un par de cojinetes apoyados en unos tacos de madera.

Desde el punto de vista técnico, importa determinar la potencia que desarrollaban los batanes, así como su velocidad angular. Pero la potencia no puede precisarse directamente con los datos de que se dispone; sólo se habría podido recurrir a la experiencia de los que trabajaban en el batán, los pisadores.

Con una pendiente de unos 60 grados, un conducto de 4 metros de largo y 0,09 metros cuadrados de sección llevaría un caudal de más de 700 litros por segundo, con una velocidad de caída del agua al final del conducto de más de 8 metros por segundo. Por lo tanto, la velocidad efectiva con que el agua incidiría sobre la pala horizontal de la rueda sería de alrededor de 7 metros por segundo.

La fuerza que el agua ejerce sobre la rueda depende del caudal y de la diferencia entre las velocidades del movimiento instantáneo de la pala donde incide y de la corriente. Al final, en condiciones ideales, sin pérdida alguna por fricción, la rueda giraría tan deprisa como el agua corriese, pero ya no podría hacer ningún trabajo sin perder velocidad porque el agua no ejercería fuerza alguna sobre ella.

Al pie de las peñas, estaban unas casas mal hechas, que más parecían ruinas de edificios que casas, de entre las cuales advirtieron que salía el ruido y estruendo de aquel golpear, que aún no cesaba.

Y eran —si no lo has, ¡oh lector!, por pesadumbre y enojo— seis mazos de batán, que con sus alternativos golpes aquel estruendo formaban.

Así es verdad —dijo Sancho—, pues sólo el ruido de los mazos de un batán pudo alborotar y desasosegar el corazón de un tan valeroso andante aventurero como es vuestra merced.

El Quijote, primera parte, capítulo XX

Habrá, pues, una velocidad lineal de la rueda sostenible que maximice la potencia de la rueda. Esa velocidad óptima es igual a la mitad del cuadrado de la velocidad de la corriente (es entonces cuando se extrae toda la energía cinética del agua). Por tanto, para una rueda de un metro de radio y una velocidad del agua efectiva de alrededor de 7 metros por segundo, la velocidad de giro ideal sería de algo más de 30 revoluciones por minuto.

La potencia máxima correspondiente a esa velocidad de giro y el caudal que sabemos solían tener los batanes es de unos 20.000 watt, o unos 25 caballos (un coche de turismo normal tiene cien o ciento y pico caballos de potencia). Pero no cabe esperar que toda ella pueda emplearse en efectuar un trabajo útil. En las palas o en el giro de la rueda o en el mecanismo de los mazos se perderá energía. La magnitud de esa pérdida en los batanes históricos es lo que antes decíamos que se ignora.

José Ignacio Rojas Sola
Departamento de Ingeniería Gráfica, Diseño y Proyectos
Universidad de Jaén

Desastre en el golfo de México

El impacto del vertido de petróleo conllevará daños ambientales durante decenios

Ya han transcurrido más de 20 años desde que el *Exxon Valdez* encallase en las costas de Alaska, pero las nutrias marinas siguen hozando en lodos contaminados al buscar almejas en Prince William Sound. Casi 25 años después de la ruptura de un tanque de almacenamiento de combustible cerca de los manglares y arrecifes coralinos de Bahía Las Minas, en Panamá, todavía aparecen en el agua manchas e irisaciones de petróleo. Y hace más de 40 años que la barcaza *Florida*, cargada con fuelóleo, embarrancó cerca del Cabo Cod; debido a los detritus acumulados bajo la vegetación de las marismas, el olor de la zona recuerda una estación de servicio.

Las costas estadounidenses del golfo de México podrían sufrir daños similares, en vista de los miles de metros cúbicos de crudo ligero expulsados por el pozo destruido de la compañía BP, situado a 1500 metros de profundidad y a unos 100 kilómetros de la costa de Louisiana. La plataforma de perforación Deepwater Horizon hizo explosión el pasado 20 de abril y los esfuerzos por contener la fuga de petróleo —estimada entre unos 800 y varios millares de metros cúbicos al día— en las semanas posteriores al accidente, sufrieron retrasos y numerosos reveses. El crudo derramado podría superar en varias veces el vertido del *Valdez*, lo que amenazaría los ecosistemas, la habitabilidad y la economía de la región durante años.

El crudo contiene una variedad de compuestos tóxicos, pero los que causan mayor inquietud son los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) como el naftaleno, el benceno, el tolueno y los xilenos. Todos ellos ejercen efectos negativos en el hombre, la fauna y la flora. “Los daños provocados por esos hidrocarburos son especialmente graves si se ingieren o inhalan”, explica Ronald J. Kendall, ecotoxicólogo de la Universidad Politécnica de Texas. “En los mamíferos y las aves, pueden transformarse en compuestos más tóxicos aún y alterar el ADN.” Las mutaciones consiguientes podrían reducir la fecundidad y provocar cáncer, además de otras enfermedades.

Empero no todos los HAP suponen una amenaza ambiental. El crudo que alcanza la superficie libera, mediante la evaporación, entre un 20 y 40 por ciento de la cantidad inicial de hidrocarburos. “La evaporación resulta favorable, pues elimina de forma selectiva muchos compuestos indeseables en el agua”, opina Christopher M. Reddy, experto en química marina de la Institución Oceanográfica Woods Hole. El crudo también se emulsiona; forma una espuma de hidrocarburos y agua o se apelotona en pellas bituminosas.

Para sorpresa de los científicos, a unos 1000 metros de profundidad se han descubierto, en suspensión en el agua, penachos de crudo de varios kilómetros de longitud. De ellos se desprenden compuestos tóxicos que contaminan el agua. Esas sustancias “se infiltran con mayor facilidad y persistencia en las marismas”, con la consiguiente perturbación de tales ecosistemas, afirma Reddy. Y son muchas las especies que se verían perjudicadas: unas 16.000, según el biólogo Thomas Shirley, de la Universidad A&M de Texas. Muchos de sus hábitats “están amenazados, pero no disponemos de ningún procedimiento directo para saber cuáles, ni en qué medida resultarían afectados”, informaba el pasado 12 de mayo la bióloga Jane Lubchenco, directora de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA), en una rueda de prensa sobre la fuga.

En la zona del escape mismo, “toda la columna de agua situada sobre éste sufrirá las consecuencias” de los compuestos del crudo, afirma Shirley. Pésima noticia para los millones de organismos zooplanctónicos que allí existen. La contaminación podría, en última instancia, provocar una cascada de efectos nocivos que asciendan por la cadena trófica. Shirley se pregunta, “¿Qué ocurrirá si desaparece una parte de la enorme e intrincada red trófica de la región? En verdad no lo sabemos, pero muy probablemente, nada bueno”.

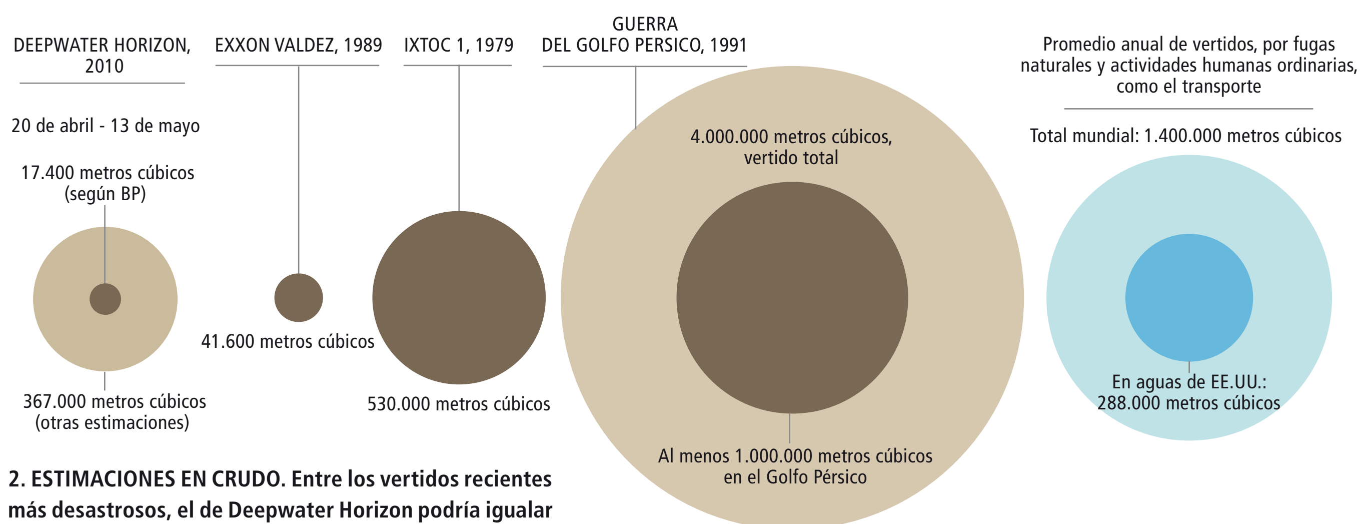
Con respecto a los daños a largo plazo, los investigadores temen sobre todo las alteraciones en el medio terrestre. “Una vez que el crudo alcance los humedales costeros —sea empujado por las mareas altas o los vientos fuertes—, quedará atrapado en los sedimentos”, señala Héctor M. Guzmán, del Instituto Smithsonian de Investigación Tropical de Panamá, que estudió los efectos del derrame de 1986 en ese país. “Y en ese lugar el petróleo persiste durante decenios”. Especialmente críticas son las ciénagas, que constituyen criaderos para la fauna silvestre, tanto de peces como de aves; la contaminación podría perjudicar a los embriones y afectar una especie durante generaciones.

Que la marea negra no alcance los pantanos y charcas costeras dependerá de un único factor: el tiempo atmosférico. Con mar gruesa, las barreras de contención de poco servirán. “Un huracán e incluso una borrasca tropical podría resultar catastrófica”, insiste Kendall, “ya que empujaría el petróleo hasta lugares difíciles de limpiar”.



1. UN MAR ENFERMO. Tras la explosión de la plataforma de perforación Deepwater Horizon, se han formado enormes manchones de crudo en el golfo de México. Los hidrocarburos tóxicos del petróleo entrañarían riesgos para la salud ambiental durante decenios.

JOE RAEDLE *Getty Images (fotografía)*; JEN CHRISTIANSEN; FUENTE: BP, NOAA Y NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES



2. ESTIMACIONES EN CRUDO. Entre los vertidos recientes más desastrosos, el de Deepwater Horizon podría igualar al de IXTOC 1, en el golfo de México, cerca del Yucatán.

Como es obvio, todo el mundo espera que el petróleo se haya retirado o disipado antes de que tal hecho acontezca. Sin duda, las condiciones más cálidas del golfo de México contribuirán a que las bacterias y otras fuerzas naturales degraden con mayor prontitud el crudo que en el vertido de Prince William Sound. Ya desde el principio se utilizaron millones de litros de dispersantes químicos que facilitasen la fragmentación de los manchones. Sin embargo, los dispersantes conllevan otros riesgos y toxicidad, lo que también preocupa a los ecólogos. Dadas las circunstancias, probablemente haya sido Lubchenco, la directora de la NOAA, quien mejor lo haya resumido: “Cuando se produce un vertido, el pronóstico nunca es halagüeño”.

David Biello

Sobrevivir a la sal

Las bacterias halófilas medran en ambientes hipersalinos gracias a unas proteínas ácidas que evitan la muerte celular por choque osmótico

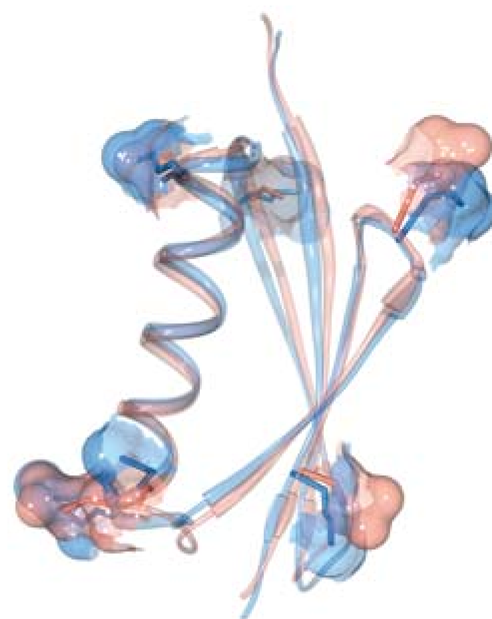
Gracias a la evolución, la vida consigue abrirse paso hasta en las condiciones ambientales más adversas del planeta. Hallamos un ejemplo de ello en las bacterias halófilas (“amantes de la sal”, en griego), microorganismos del dominio de las arqueas que medran en lagos salados y zonas volcánicas.

En principio, la elevada salinidad de esos medios es incompatible con la supervivencia de la célula, que no tardaría en deshidratarse debido al choque osmótico, es decir, a la tendencia a equilibrar la concentración de electrolitos con la del entorno. Sin embargo, las arqueas halófilas proliferan en ambientes hipersalinos; al equilibrar la concentración de sal de su citoplasma con la del exterior, evitan la muerte celular por ósmosis.

Las proteínas estructurales y las enzimas que conforman el metabolismo celular de esos microorganismos han sufrido una evolución adaptativa que les ha conferido estabilidad y funcionalidad en condiciones hipersalinas. Como resultado de este proceso, de los veinte aminoácidos que constituyen las proteínas, dos (ácido aspártico y ácido glutámico) han aumentado su frecuencia y otros (entre ellos la lisina y la leucina) han desaparecido casi por completo. Por eso mismo, en la superficie de las proteínas “halófilas” abundan las cargas eléctricas negativas. Estas proteínas se encuentran entre las más ácidas del proteoma. Parece ser que tal composición aminoacídica atípica les confiere “resistencia” a la sal. Pero, ¿cómo opera semejante efecto protector?

Estudio molecular

Un estudio realizado en la Unidad de biología estructural del CICbioGUNE y publicado en el número de diciembre de 2009 de la revista *PLoS Biology* ha demostrado que dicha composición aminoacídica restringe el número de contactos con el disolvente y, por tanto, facilita la adaptación de las proteínas a ambientes hipersalinos. Este sería el mecanismo que subyace bajo el comportamiento halófilo.

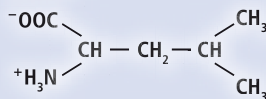


1. SUPERPOSICION de las cadenas polipeptídicas de la proteína L nativa mesófila (*azul*) y del mutante múltiple halófilo (*rojo*). Se muestran las cadenas laterales donde se han producido las mutaciones.

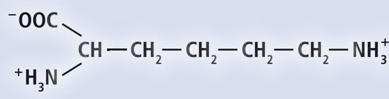
AMINOACIDOS ADAPTADOS A LA SAL

Las proteínas de las bacterias halófilas poseen una composición aminoacídica atípica: en ellas abundan el ácido glutámico y el ácido aspártico, y escasean, entre otros aminoácidos, la lisina y la leucina.

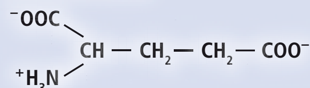
LEUCINA



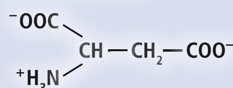
LISINA



ACIDO GLUTAMICO



ACIDO ASPARTICO



DOS EN UNO: ESTABILIDAD Y SOLUBILIDAD

El ácido glutámico y el aspártico presentan un comportamiento químico que favorece la adaptación a los medios hipersalinos.

Por un lado, su cadena lateral presenta un tamaño reducido. Requieren así un número inferior de moléculas de solvente (agua) para hidratarse. Al facilitar la hidratación, permiten que la célula equilibre la concentración salina con el exterior y evitan, por tanto, que ésta muera por choque osmótico.

Por otro lado, al poseer una carga eléctrica negativa, estos aminoácidos confieren solubilidad a las proteínas.



2. LA VIDA SE ABRE PASO incluso en medios tan hostiles como las salinas. En la imagen, la salina boliviana de Uyuni.

Se han estudiado tres proteínas: un dominio de una enzima perteneciente a un organismo halófilo, su homólogo mesófilo (el que se encuentra en organismos que viven en condiciones de salinidad baja) y un dominio de una proteína distinta. Mediante mutagénesis dirigida, se ha alterado la composición de las proteínas. A continuación, se ha estudiado la termodinámica de los mutantes obtenidos para evaluar su estabilidad en presencia de la sal. Asimismo, se ha determinado su estructura molecular (mediante resonancia magnética nuclear) para cuantificar los cambios conformacionales introducidos con la mutación.

Los resultados indican que la carga eléctrica de la proteína ejerce una función limitada en la estabilización en medios salinos. El factor determinante parece ser la disminución del tamaño de la cadena lateral del aminoácido. En presencia de altas concentraciones del cosoluto salino, disminuye la concentración de agua; el solvente debe repartirse para hidratar a los iones y a la proteína. Si la proteína posee aminoácidos de cadena corta, se restringe el número de contactos necesarios entre proteína y disolvente, con la consiguiente estabilización del sistema.

Si lo importante es el tamaño de la cadena lateral, ¿a qué se debe la abundancia de aminoácidos dotados de carga negativa (ácidos)? Experimentos adicionales publicados en el mismo estudio indican que este tipo de aminoácidos confieren solubilidad a la proteína.

El trabajo realizado proporciona una explicación plausible para la particular composición aminoacídica de las proteínas pertenecientes a las arqueas halófilas y allana el camino para ahondar en el complejo funcionamiento de las enzimas en medios salinos. Asimismo, el hallazgo podría aplicarse al rediseño de enzimas mediante mutagénesis, para la mejora de sus propiedades con fines industriales, dado que la introducción selectiva de aminoácidos dotados de carga negativa podría aumentar, en ciertos casos, la eficiencia catalítica de las enzimas en los biorreactores, donde escasea el agua.

Oscar Millet
Unidad de biología estructural
CICbioGUNE

Las máquinas omnipresentes

Mediante diminutos sensores podremos auscultar el mundo físico del mismo modo que Internet cartografía el ciberespacio

A principios de 2009, Hewlett-Packard anunció el lanzamiento del Sistema Nervioso Central para la Tierra (CeNSE, por sus siglas en inglés), un ambicioso proyecto en el que en diez años se repartirían por todo el planeta hasta un billón de sensores diminutos como tachuelas. Los técnicos dicen que la información recopilada por esta omnipresente red sensorial podría cambiar nuestro conocimiento del mundo real con igual profundidad que Internet ha transformado la actividad comercial. Nos encontramos ahora como en los albores de la Web pero con percepciones de ámbito universal, lo que deja entrever una asombrosa y ya próxima revolución.

La proliferación de minúsculos sensores versátiles que generen datos adecuados para el examen y el procesamiento informático irá mucho más allá de la simple comprensión de la naturaleza. Por citar ejemplos, los edificios podrían gestionar la energía que consumen; los puentes, avisar de que necesitan reparación urgente; los automóviles, vigilar la situación del tráfico y detectar puntos conflictivos, y los sistemas de seguridad doméstica distinguir entre las pisadas de un intruso y las del perro.

Aunque el CeNSE ha sido la iniciativa más audaz, Hewlett-Packard no es la única entidad que se dedica al desarrollo de redes sensoriales. También Intel y numerosos laboratorios universitarios trabajan en este campo.

Pese a todo el interés despertado, llenar el mundo de sensores no es la única solución concebible. Tales aparatos deben proporcionar datos fiables en abundancia y ser resistentes a entornos adversos. Los propios paquetes sensores serán de tamaño reducido aunque habrán de soportar una intensa labor de computación: transmitir toda la información captada, hospedarla en centros servidores y analizarla. Por último, alguien tendrá que financiar toda la obra. Como dice Deborah Estrin, de la Universidad de California en Los Angeles, “cada sensor tiene su coste: requiere mantenimiento, energía y calibración permanente. No es sólo dejarlos caer por ahí”.

De hecho, Peter Hartwell, investigador de Hewlett-Packard, reconoce que los sensores del CeNSE habrán de ser casi gratuitos para que el proyecto cumpla sus objetivos. Por tal razón, entre otras, la empresa diseña un paquete sensor único, diminuto, que mide a la vez variables como luz, temperatura, humedad, vibración y esfuerzos, en lugar de utilizar un dispositivo distinto para cada tarea. Hartwell asegura que el concentrarse en un dispositivo versátil aumentará el volumen de producción y, por tanto, reducirá el coste de cada unidad, pero también permitiría atender de forma simultánea a varios clientes con los mismos sensores.

El proyecto más destacado acometido por Hartwell es un acelerómetro ultrasensible. Un sensor alojado en un chip rastrea los desplazamientos de una minúscula plataforma interna con respecto al resto del chip. Mide las variaciones de aceleración con una precisión 1000 veces mayor que la conseguida en la Nintendo Wii.

Según Hartwell, esos sensores ubicados cada cinco metros a lo largo de una autopista operarían a modo de miniestaciones meteorológicas (de temperatura, humedad y luz). Asimismo, los datos sobre vibraciones registrados por el acelerómetro permitirían evaluar las condiciones del tráfico (cuántos vehículos circulan y a qué velocidad). Piensa que esta información sería útil para la vigilancia de autovías, pero también para indicar por medios inalámbricos la ruta más rápida para llegar en coche al aeropuerto y otras aplicaciones personalizadas.

Sin duda, tamaño acopio y transmisión de datos requiere fuentes de alimentación; para garantizar una larga vida útil, el sensor no podrá depender exclusivamente de baterías, sino que habrá de incorporar algún sistema que las mantenga cargadas, tal vez un panel solar o dispositivo termoeléctrico.

Preocupados por el suministro de energía, otros grupos ya abandonan del todo las baterías. En los laboratorios Intel de Seattle, el ingeniero Josh Smith ha desarrollado un paquete sensor que funciona con alimentación inalámbrica. Como el de Hewlett-Packard, esta “plataforma inalámbrica de sensores e identificadores” (WISP, por sus siglas en inglés) incluirá una gama de medidores, pero además extraerá energía de las ondas radioeléctricas que emiten los lectores de identificación por radiofrecuencia de largo alcance presentes en el chip. Smith afirma



CHRISTOPH NIEMANN

que un lector único enchufado en una toma mural puede dar alimentación y comunicarse con una red de WISP prototipo situados de 1,5 a 3,0 metros, distancia que aumentará en el futuro.

Muchas de las aplicaciones infraestructurales que enumera Smith coinciden con las citadas por Hartwell, a las que añade otras. Si las WISP se colocaran en objetos corrientes de uso doméstico, copas por ejemplo, esas etiquetas podrían informar al médico acerca del progreso en la recuperación de un paciente que hubiera sufrido una apoplejía. Si permanecen fijas las copas que suele utilizar el paciente, se deducirá que éste no se ha levantado ni movido por los alrededores.

La gama de posibles aplicaciones de las redes sensoriales es tan amplia que, como en el caso de Internet, resulta imposible predecirlas en su totalidad. "En cuanto a la posible repercusión en nuestras vidas", añade Hartwell, "aún no podemos imaginarla".

Gregory Mone

Evaluación de riesgos geológicos

Técnicas avanzadas de radar permiten medir, con una precisión milimétrica, la deformación de la superficie de un terreno a lo largo del tiempo

Los sistemas radar de apertura sintética (SAR) emiten un pulso de ondas microondas que rebota en la superficie del terreno y es medido de nuevo por el sensor. Estos sistemas radar pueden ser transportados por un satélite, un avión o una plataforma terrestre; ello permite obtener imágenes complejas de alta resolución de la superficie del terreno (imágenes SAR).

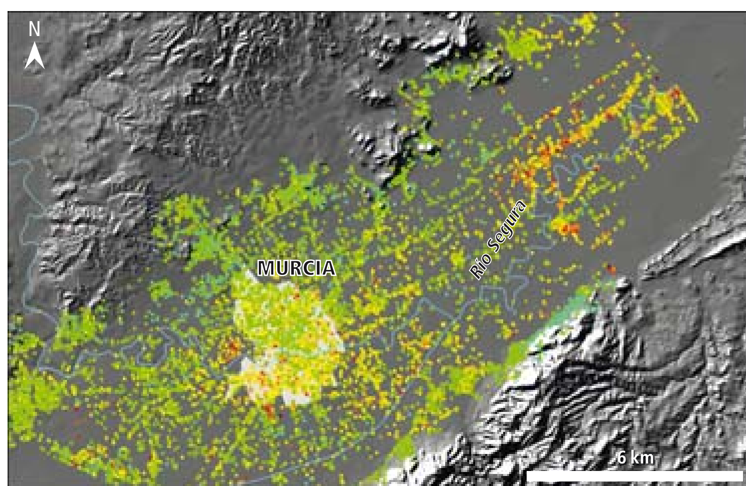
Existen varios satélites operativos que proporcionan imágenes SAR de todo el globo terráqueo cada 11 o 45 días. Algunos de ellos, como los ERS 1-2 y ENVISAT de la Agencia Espacial Europea, operan desde 1992. Las imágenes de archivo se utilizan para realizar estudios históricos de los movimientos del terreno.

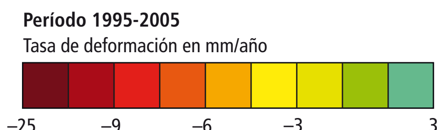
Cada píxel de una imagen SAR corresponde a un número complejo con un valor de amplitud y otro de fase. La amplitud guarda relación con el coeficiente de respuesta de la superficie del terreno (dispersión). La fase contiene información sobre la distancia que recorre la señal desde el sensor hasta la superficie del terreno. La interferometría radar diferencial (DInSAR) compara la fase de dos imágenes SAR de la misma zona de estudio obtenidas en fechas distintas para medir las deformaciones de la superficie del terreno en dicho período.

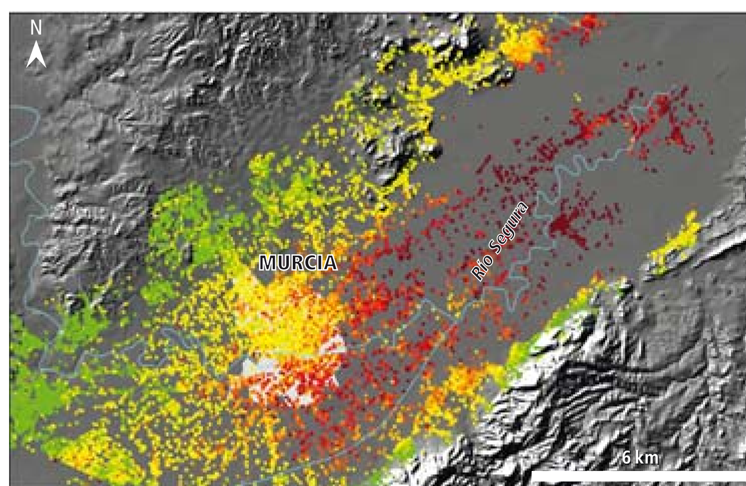
No obstante, esa técnica entraña ciertas limitaciones que deben tenerse en cuenta. Pueden medirse sólo deformaciones en puntos de la superficie cuya dispersión es estable a lo largo del tiempo estudiado. Las zonas urbanas o con una abundante presencia de rocas suelen ser las más adecuadas; en las zonas rurales sin rocas y con vegetación, en cambio, resulta muy difícil medir las deformaciones. Otra fuente de error que altera la calidad de los resultados son los cambios atmosféricos.

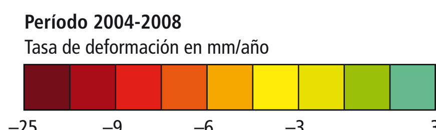
Técnicas avanzadas: ventajas e inconvenientes

A partir del año 2000 se desarrollaron nuevas técnicas de interferometría diferencial avanzada (A-DInSAR), que permitieron mejorar la medición de la deformación de la superficie del terreno y minimizar las fuentes de error asociadas.

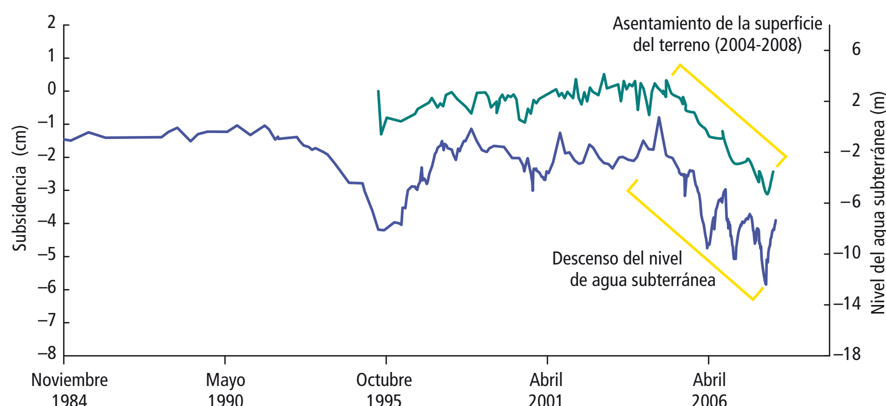








1. TASA DE LA DEFORMACION SUPERFICIAL (subsidencia) del área metropolitana de Murcia medida durante los períodos 1995-2005 (*izquierda*) y 2004-2008 (*derecha*). Se observan zonas estables (*verde*) y un hundimiento máximo de hasta 2,5 centímetros anuales (*marrón*).



2. EVOLUCION TEMPORAL de la deformación de uno de los puntos detectados en la zona urbana (*verde*). Muestra una relación directa con la evolución temporal del nivel del agua subterránea (*azul*).

Estas técnicas se fundan en el análisis conjunto de un gran número de imágenes SAR (de 20 a 25), lo que permite medir la evolución de la deformación de la superficie a lo largo del período estudiado.

Se ha aplicado la técnica A-DInSAR al estudio de la subsidencia del área metropolitana de Murcia entre 1995 y 2008. La zona de estudio ocupa la Vega Media de la cuenca del río Segura, formada por un sistema acuífero detrítico multicapa que experimenta procesos de subsidencia motivados por la explotación del agua subterránea.

Los resultados de la investigación, llevada a cabo por el Instituto Geológico y Minero de España en colaboración con la empresa Altamira Information en el marco del proyecto europeo TERRAFIRMA, ilustran los pros y los contras de las técnicas de radar.

En cuanto a las ventajas, esa técnica permite medir la deformación en numerosos puntos (más de 60.000) del área de estudio (200 kilómetros cuadrados). Asimismo, posibilita el estudio de la evolución temporal de la deformación de cada punto, con una precisión milimétrica, a lo largo del período estudiado.

En cuanto a los inconvenientes, las medidas se limitan a deformaciones lentas: entre 15 y 48 centímetros al año, según el satélite radar utilizado. Por otro lado, no pueden detectarse puntos en áreas cultivadas o en áreas urbanas que han experimentado cambios notables. Problema que puede solucionarse mediante la instalación, en zonas de interés, de puntos artificiales (triedros de aluminio que reflejan de manera óptima la señal del radar).

Aplicaciones

Las técnicas avanzadas de radar han demostrado su utilidad en la medición de deformaciones superficiales asociadas a otros tipos de subsidencia: deformaciones desencadenadas por disolución de roca, explotaciones mineras, excavación de túneles, extracción e inyección de otros fluidos y movimientos de ladera lentos.

La gran diferencia y singularidad de esas técnicas respecto a otras más clásicas es que proporcionan una gran cantidad de medidas de la deformación superficial en grandes áreas; ello permite ahondar en los mecanismos que controlan la dinámica de los procesos geológicos superficiales, desarrollar y mejorar nuevos modelos de predicción de la susceptibilidad, peligrosidad y riesgo geológico, y crear sistemas de apoyo a la gestión del riesgo para una mejor ordenación y planificación territorial.

Las técnicas de radar avanzadas permiten, pues, mejorar la gestión del riesgo de los movimientos del terreno asociados a la explotación de acuíferos subterráneos, los yacimientos de petróleo y gas, la inyección de CO_2 en depósitos subterráneos, la actividad minera o la construcción y mantenimiento de infraestructuras (carreteras, túneles, líneas de ferrocarril, presas, centrales nucleares, puertos o aeropuertos). Y todo ello con una precisión milimétrica y con la ventaja de trabajar a distancia.

Gerardo Herrera García
Area de peligrosidad y riesgos geológicos
Departamento de investigación y prospectiva geocientífica
Instituto Geológico y Minero de España

Neutrinos para observar el cosmos

Los neutrinos no son sólo una curiosidad de la física de partículas, sino también una herramienta práctica en astronomía

Graciela B. Gelmini, Alexander Kusenko y Thomas J. Weiler

En 2002, cuando la Comisión Nobel otorgó el galardón a Ray Davis y Masatoshi Koshiba, eran varios los méritos que pudo haber enfatizado. Entre otros hallazgos, Davis había detectado los neutrinos solares (la primera vez que se observaban neutrinos de procedencia cósmica) y Koshiba, los originados en la gran supernova de 1987. Su trabajo supuso una proeza experimental que, años más tarde, ayudó a confirmar que los neutrinos, en contra de lo que muchos teóricos habían asumido, poseían una pequeña masa. Sin embargo, a Davis y Koshiba se les reconoció, por encima de todo, la creación de una nueva disciplina: la astronomía de neutrinos.

Con ello, además de una notable curiosidad teórica, los neutrinos se convirtieron en una herramienta para explorar el universo. Al igual que los astrónomos de hace un siglo se embarcaron en la construcción de los primeros telescopios ópticos gigantes, hoy se procede al diseño de enormes telescopios de neutrinos. Con ellos se han detectado decenas de miles de estas partículas y ya se han obtenido las primeras imágenes en neutrinos del Sol.

A día de hoy, los neutrinos procedentes de fuentes cósmicas son difíciles de distinguir de los que se generan en las capas altas de la atmósfera terrestre. Pero esta barrera se superará dentro de muy poco. Cuando ello ocurra, estaremos en condiciones de atisbar en toda una serie de fenómenos hasta ahora insondables. La misma partícula que una vez se consideró inobservable se convertirá en una herramienta básica en astronomía y cosmología.

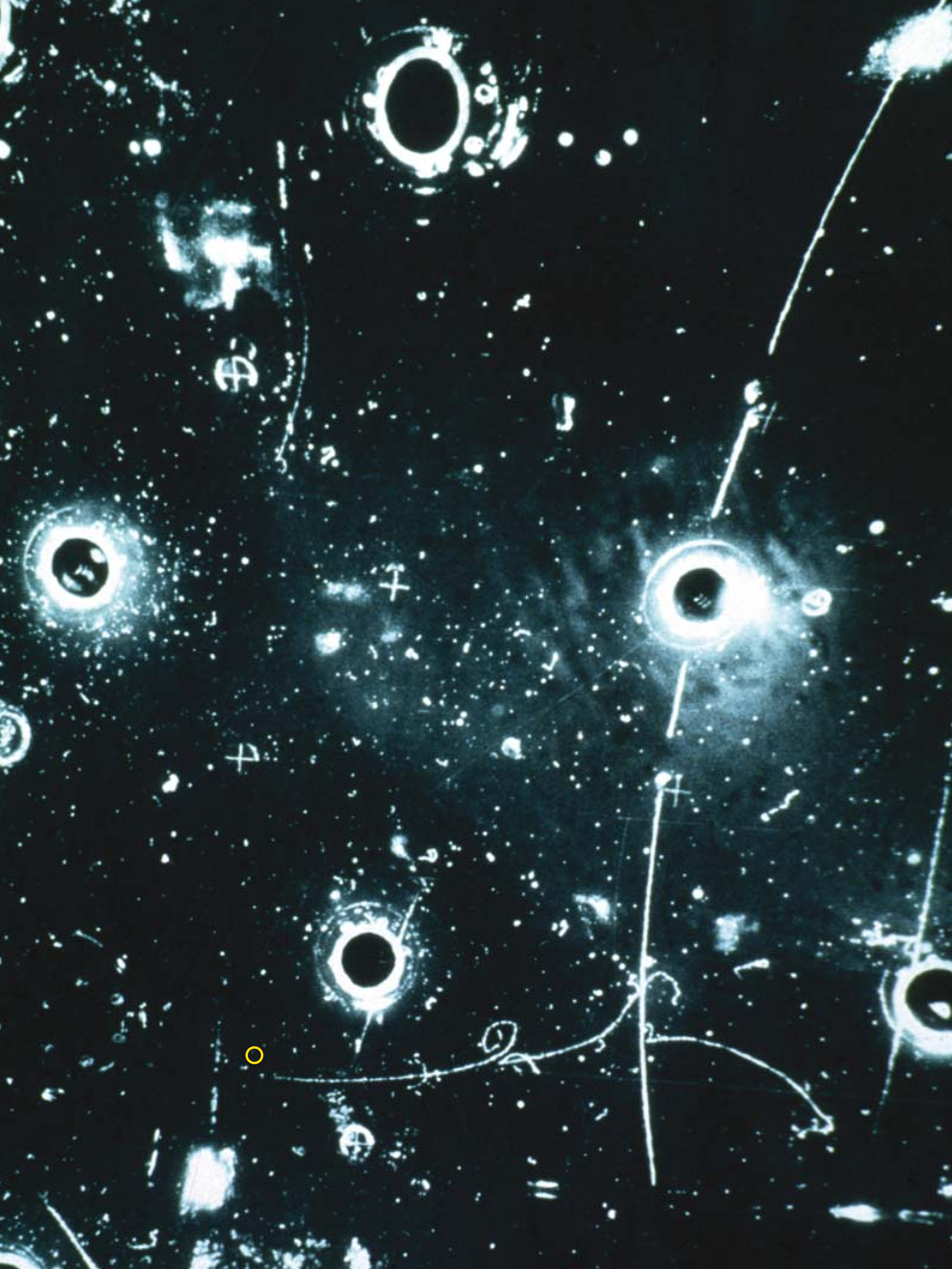
Cuando estudiamos el Sol a partir de la luz que emite, lo único que en realidad estamos viendo son unos pocos cientos de kilómetros de la región más elevada de la atmósfera solar. Aunque la luz se origina en las reacciones nucleares que tienen lugar el centro de la estrella, esa radiación es absorbida y reemitida varios billones de veces a través de las distintas capas de gas. Sólo cuando se halla muy cerca de

CONCEPTOS BASICOS

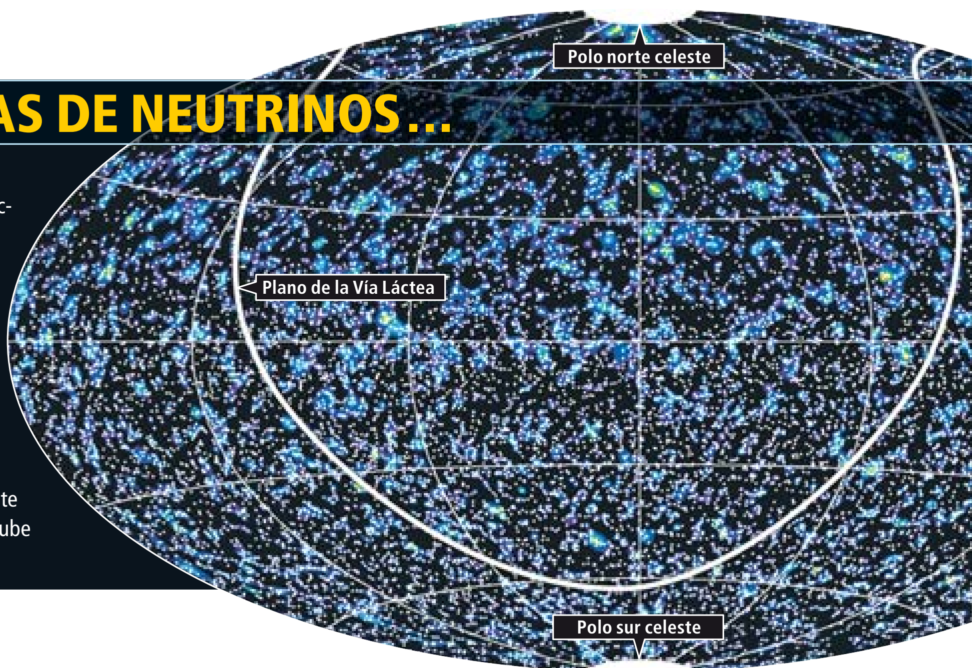
- Los neutrinos permiten obtener "radiografías" extremadamente penetrantes de numerosos procesos cósmicos. Al ser las partículas elementales que menos interaccionan, atraviesan con suma facilidad toda materia interpuesta en su camino. Su detección permite observar el interior de las estrellas y otros recónditos lugares del cosmos.
- Desafortunadamente, la misma propiedad que hace a los neutrinos tan útiles explica su tendencia a atravesar los detectores sin dejar rastro. Hasta este año no se había alcanzado la sensibilidad instrumental suficiente para detectar con fidelidad fuentes cósmicas de neutrinos.
- Existen diferentes clases de neutrinos. Al propagarse por el espacio, los neutrinos de una clase se transmutan espontáneamente en otra. Esta propiedad particular sirve para obtener información adicional acerca de sus orígenes.

UN NEUTRINO INVISIBLE entra desde la izquierda en una cámara de burbujas e impacta contra un electrón (*círculo amarillo*), que sale despedido hacia la derecha (*línea garabateada*). La imagen, de la cámara de burbujas *Gargamelle* del CERN, data de 1972. Este y otros experimentos similares ayudaron a apuntalar el modelo estándar de la física de partículas y forjaron el escenario en el que se enmarca el empleo de los neutrinos para las observaciones astronómicas.

CORTESIA DEL CERN



SI TUVIERAMOS GAFAS DE NEUTRINOS...



EL CIELO EN NEUTRINOS
Con unas gafas para neutrinos el cielo adoptaría un aspecto similar al que ofrece esta imagen, realizada entre abril de 2008 y mayo de 2009 por el observatorio en construcción IceCube. Los casi 20.000 neutrinos detectados (*puntos*) proceden del cosmos y de las capas altas de la atmósfera. Al sustraer la producción atmosférica estimada, se obtienen las posibles fuentes cósmicas (*coloreadas*). (La imagen es sólo una estimación de fuentes posibles; se necesitará un IceCube terminado para identificar las fuentes astronómicas sin ambigüedad). Gracias a que la Tierra es prácticamente transparente al paso de neutrinos (excepto los de mayor energía), IceCube observa a la vez el cielo austral y el septentrional.

CORTESIA DE LA COLABORACION ICECUBE

la superficie consigue escapar al espacio. Por el contrario, la detección de neutrinos solares nos permite observar directamente el foco de los procesos de fusión nuclear: el uno por ciento más caliente y recóndito del Sol. La diferencia entre la luz y los neutrinos estriba en que éstos atraviesan las capas exteriores del Sol con suma facilidad, prácticamente como si se tratase del espacio vacío.

Los neutrinos también nos permitirán explorar con detalle las supernovas, los estallidos cósmicos de rayos gamma o los discos de acreción de los agujeros negros de gran masa. Se estima que los grandes detectores que actualmente se hallan en construcción observarán en torno a una supernova al año en alguna de las 50 galaxias más cercanas a la nuestra. También deberían ver algunos de los cientos de explosiones de rayos gamma que se producen anualmente, por no mencionar la posibilidad de detectar otros cuerpos celestes más exóticos que, hasta ahora, bien podrían haber pasado desapercibidos. Pero, al igual que cualquier herramienta nueva, el neutrino exigirá un tiempo de acomodación. Los astrónomos habrán de afrontar su disciplina desde otra perspectiva.

Los beneficios de ser asocial

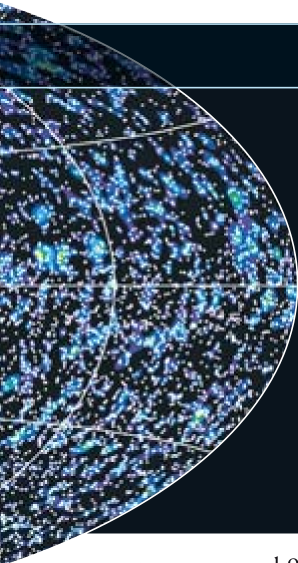
Para un físico de partículas, el neutrino se parece al electrón, sólo que sin carga eléctrica. Esto implica que es inmune a las fuerzas electromagnéticas, que son las que intervienen en casi todos los procesos cotidianos. Por ejemplo, cuando nos sentamos en una silla, es la repulsión eléctrica la que impide que atravesemos el asiento y caigamos. En las reacciones químicas, los átomos intercambian o comparten electrones. Cuando un material absorbe o refleja la luz, las partículas cargadas reaccionan ante las ondas electromagnéticas. Los neutrinos, al ser eléctricamente neutros, no desempeñan ninguna función en la física atómica o molecular, motivo por el cual son casi invisibles.

Los autores

Graciela B. Gelmini es profesora de física de la Universidad de California en Los Angeles (UCLA). **Alexander Kusenko** se trasladó a la Universidad de Stony Brook tras su licenciatura; actualmente pertenece también a la UCLA. Este y Gelmini trabajan en el Observatorio Pierre Auger, en Argentina. **Thomas J. Weiler** estudió en la Universidad de Stanford y en la Universidad de Wisconsin-Madison. Hoy es profesor de física en la Universidad de Vanderbilt y miembro del equipo del Observatorio Espacial del Universo Extremo.

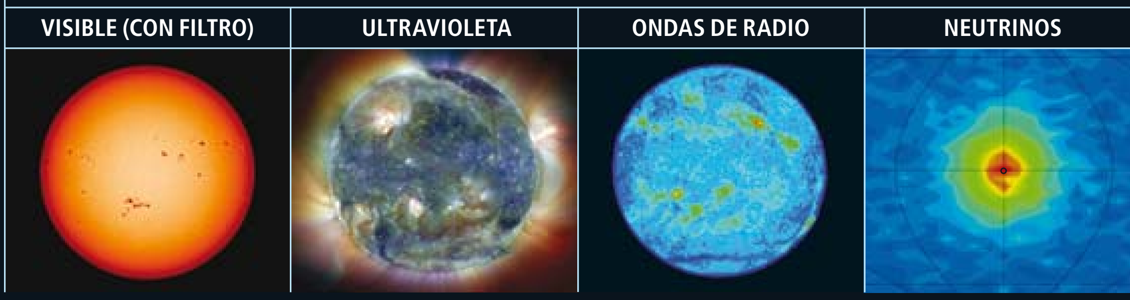
Las clases conocidas de neutrinos reaccionan ante la fuerza nuclear débil. Esta interacción es la responsable de la desintegración beta (la que tiene lugar cuando un neutrón se desintegra en un protón, un electrón y un antineutrino) y de la fusión de elementos pesados. Pero, tal y como su nombre indica, la misma es insignificante salvo a distancias muy cortas. Así, los neutrinos apenas interaccionan con otras partículas. Para detectarlos es necesario monitorizar grandes volúmenes de materia y esperar la rara ocasión en la que un neutrino deja su huella. Si, tal y como suponen los astrónomos, los neutrinos cósmicos son tan energéticos como los rayos cósmicos (los protones e iones que constantemente bombardean nuestro planeta), hará falta un kilómetro cúbico de materia para poder capturar una muestra significativa. De hecho, los mayores observatorios de neutrinos exhiben tamaños de este orden (*véase el recuadro* "Telescopios poco habituales").

Pero a pesar de interaccionar tan poco, los neutrinos son fundamentales en numerosos procesos cósmicos. Se obtienen como subproducto de la desintegración beta, la cual constituye un paso intermedio crucial en la fusión nuclear en las estrellas, amén de calentar los restos de las estrellas explosionadas o el interior de los planetas. Además, los neutrinos resultan decisivos en uno de los dos tipos principales de supernovas que existen: las que siguen al colapso gravitatorio de una estrella de gran masa. La implosión comprime la estrella hasta que se alcanzan densidades comparables a las de un núcleo atómico; en cierto momento, se genera un flujo explosivo y se liberan del orden de 10^{58} neutrinos en un intervalo de entre 10 y 15 segundos. Con tales cifras, incluso las partículas más asociales se convierten en las protagonistas. De hecho, los neutrinos



IMAGENES DEL SOL

Los astrónomos han observado el Sol en todas las longitudes de onda de la luz y, recientemente, han hecho lo mismo con neutrinos. La imagen es borrosa (el experimento que tomó esta imagen, Super-Kamiokande, cuenta con una resolución de 26 grados; el Sol apenas ocupa unos 0,5 grados); pese a todo, constituye un hito histórico. Mientras que la luz sólo nos muestra la superficie solar, los neutrinos revelan el interior del astro.



transportan el 99 por ciento de la energía total liberada en el cataclismo, lo que quiere decir que su observación nos permite analizar el 99 por ciento de lo que los telescopios comunes no observan. La detección de los neutrinos procedentes de la supernova de 1987 confirmó la teoría básica del colapso estelar [*véase* "La gran supernova de 1987", por Stan Woosley y Tom Weaver; Investigación y Ciencia, octubre de 1989]. En el futuro, los detectores lograrán filmar una película a tiempo real de todo el proceso, desde el colapso hasta la explosión.

Con independencia de su origen y su energía, los neutrinos llegan a la Tierra sin dificultades, algo que la luz no siempre puede hacer. Por ejemplo, fotones de rayos gamma con energías de unos 100 teraelectronvolt (es decir, de alta energía) no logran recorrer distancias superiores a unas decenas de millones de años luz. También los rayos cósmicos muy energéticos se ven bloqueados en algún momento.

Vemos pues que los neutrinos representan uno de los pocos mecanismos disponibles para estudiar algunos de los fenómenos más impactantes de la naturaleza. Resultan difíciles de capturar, pero el esfuerzo merece la pena.

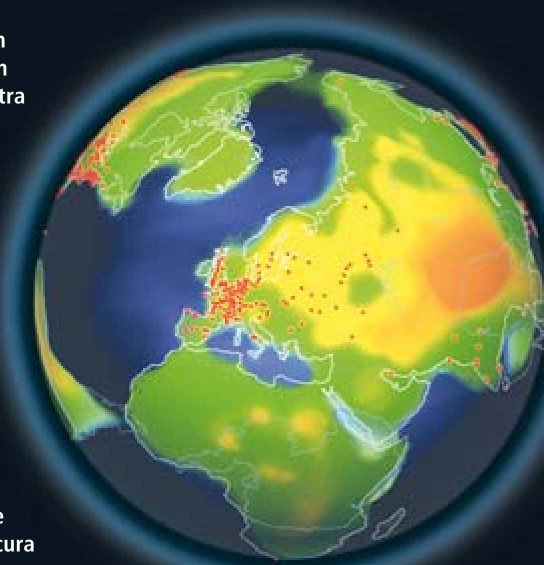
Metamorfosis de neutrinos

Además de interaccionar muy poco, los neutrinos poseen otra característica que los hace únicos: una curiosa habilidad para metamorfosearse. Al igual que las demás partículas de materia, los neutrinos se presentan en tres versiones o familias denominadas "sabores". El electrón, por ejemplo, cuenta con dos réplicas muy similares, pero más pesadas: el muon (μ) y la partícula tau (τ). Cada uno de ellos tiene asociado un neutrino: el neutrino electrónico (ν_e), el neutrino muónico (ν_μ) y el neutrino tauónico (ν_τ).

Pero mientras que el electrón, el muon y el tauón tienen masas bien definidas, los tres sabores de neutrinos no. Si se mide la masa de un neutrino de un determinado sabor, se obtiene, de forma aleatoria, una de entre tres respuestas posibles, cada una con una cierta probabilidad. Del mismo modo, si se mide el sabor de un neutrino con cierta masa, resulta alguno de los tres sabores posibles, pero no siempre el mismo. Un neutrino puede poseer bien una masa o bien un sabor específico, pero no ambos a la vez. Los estados de masa posibles se simbolizan por ν_1, ν_2 y ν_3, y son estados distintos de ν_e, ν_μ y ν_τ.

Los neutrinos violan nuestra intuición básica acerca de los objetos. Un balón de baloncesto, pongamos por caso, pesa 600 gramos, y una pelota de tenis, 100. Pero si se comportasen como neutrinos, un balón de baloncesto pesaría unas veces 600 gramos y otras, 100; un objeto de 600 gramos sería en

La Tierra a la luz de los neutrinos



Nuestro planeta también "brilla" débilmente en neutrinos, tal y como muestra esta reproducción artística en la que los colores indican diferentes intensidades. Los neutrinos se liberan en procesos radiactivos naturales, por lo que los geofísicos han comenzado a utilizarlos para determinar la distribución de isótopos. Otras fuentes son los reactores nucleares, las colisiones de rayos cósmicos en las capas altas de la atmósfera o la posible aniquilación de materia oscura en el núcleo terrestre.

CORTESIA DE SOHO/EIT CONSORTIUM/MDI TEAM, ESA/NASA/SOHO, STEPHEN WHITE *Universidad de Maryland/NRAO/AUI* Y SUPER-KAMIOKANDE (*soles, de izquierda a derecha*); GEORGE RETSECK (*Tierra*)

unas ocasiones un balón de baloncesto y, en otras, una pelota de tenis.

El sabor determina el modo en que cada neutrino participa de la fuerza nuclear débil. La masa de una partícula fija cómo ésta se propaga por el espacio. La desintegración beta por ejemplo produce (anti)neutrinos de un único sabor: ν_e. Pero cuando estos neutrinos vuelan libres a través del espacio, el sabor carece de importancia: es el estado de masa lo que dicta su comportamiento. El estado ν_e es una mezcla de ν_1, ν_2 y ν_3. De modo que es como si, durante su propagación, en vez de tratarse de una sola partícula, tuviésemos en realidad tres. Pero cuando el neutrino llegue al detector, interaccionará con el material de éste, y aquí es de nuevo el sabor lo que cuenta. Si, al llegar, las proporciones relativas de los estados de masa son las mismas que en origen, se sumarán para reproducir el sabor original (ν_e en el caso de la desintegración beta). Pero este no es siempre el caso. ¿Por qué?

Según la mecánica cuántica, a cada estado de masa bien definida le corresponde una onda con una frecuencia determinada. Pero cuando se propagan varias ondas juntas, éstas se superponen e interfieren entre sí. Por emplear una metáfora acústica, diremos que un neutrino se parece a una onda de sonido de tres notas puras pero ligeramente distintas. Como sabe cualquiera que alguna vez haya afinado un instrumento musical, cuando se superponen notas cercanas se aprecian "zumbidos" con un vaivén periódico; es decir, variaciones en la intensidad del sonido. En el caso de los neutrinos, la diferencia de masa es análoga a una diferencia de tonos, mientras que los "zumbidos" equivaldrían a los cambios en las proporciones relativas de los tres estados de masa. Diferentes proporciones dan lugar a distintos estados de sabor, por lo que, a medida que el neutrino se propaga, su sabor cambia. Técnicamente decimos que "oscila".

Las reacciones en el Sol generan neutrinos electrónicos. Pero estos, antes de llegar a la Tierra, ya se han convertido en una mezcla de los tres sabores. Los experimentos pioneros en el campo de Davis y Koshiba sólo eran sensibles a los neutrinos electrónicos, por lo que no detectaron los neutrinos muónicos o tauónicos en los que, a lo largo de su viaje, se habían metamorfoseado muchos de los neutrinos electrónicos generados en el Sol. Hubo que esperar hasta los años 2001 y 2002, cuando el detector del Observatorio de Neutrinos Sudbury, en Canadá, sensible a los tres sabores de neutrinos, logró tomar una muestra representativa [*véase* "La resolución del problema de los neutrinos solares", por Arthur B. McDonald, Joshua R. Klein y

CORTESIA DE REINA MARUYAMA *National Science Foundation (fotografía)*; GEORGE RETSECK *(ilustración)*; JESSICA HUPPI *(diagrama de escalas)*; JEN CHRISTIANSEN *(diagrama de sabores)*

TELESCOPIOS POCO HABITUALES

Un neutrino se detecta cuando colisiona con un núcleo atómico y libera una partícula cargada (un electrón o alguna de sus réplicas más pesadas, un muon o una partícula tau). Esta, a su vez, emite en luz visible o en ondas de radio. Dichas colisiones son muy escasas, por lo que los astrónomos deben monitorizar grandes volúmenes de materia para observar un número significativo de neutrinos. El agua, líquida o helada, es el medio más común. Es bastante densa (lo que maximiza la probabilidad de una colisión) pero a la vez transparente (lo que permite detectar la luz).

Fuente

Trayectoria del neutrino

Tierra

Trayectoria del neutrino

Núcleo atómico

Trayectoria del muon

Trayectoria del electrón

17 metros

Detector de luz

Transmisión de datos por cable

UNA MIRADA EN DETALLE: ICECUBE

IceCube es uno de los observatorios que ponen estos principios en práctica. Su material de detección es la capa de hielo antártico, unos 1,4 kilómetros bajo la estación del Polo Sur.

Los detectores de luz, del tamaño de un balón de baloncesto, se hallan enterrados en el hielo. Recogen la luz emitida por las partículas cargadas. A partir de un análisis preciso sobre los tiempos de llegada de la luz (*puntos de color en la figura principal*) se reconstruyen la dirección y energía de los neutrinos originales.

En la superficie, una red de detectores identifica los rayos cósmicos que pudieran influir en la detección de los neutrinos.

IceCube: 1000 metros

Empire State: 381 metros



Los trabajos comenzaron durante el verano de 2005/2006 y se espera concluirlos este verano. Con agua caliente, se excavan agujeros de 2,5 km y se introducen por ellos los fotodetectores.

OBSERVATORIO	DISEÑO
SUPER-KAMIOKANDE Localización: Norte de Nagoya, Japón Volumen del detector: 50.000 m^3 Fecha de operaciones: Desde 1996 Resolución angular: 26 grados Rango de energías: Entre 10^8 y 10^{12} eV	Los fotodetectores cubren un tanque gigante de agua en una mina de cinc. El proyecto Hyper-Kamiokande propone agrandar su tamaño en un factor de 20.
OBSERVATORIO PIERRE AUGER Localización: Sur de Mendoza, Argentina Volumen del detector: 30.000 km^3 (cobertura del telescopio), 20.000 m^3 (detectores en tierra) Fecha de operaciones: Desde 2004 Resolución angular: Entre 0,5 y 2 grados Rango de energías: Entre 10^{17} y 10^{21} eV	Ante todo un detector de rayos cósmicos, Auger detecta también neutrinos de alta energía. Para ello emplea una red de 1600 tanques de agua. Sus telescopios ultravioleta rastrean colisiones de partículas en la atmósfera.
RED TRANSITORIA DE IMPULSOS DE LA ANTARTIDA (ANITA) Localización: Estación de McMurdo, Antártida Volumen del detector: 1.000.000 km^3 Fecha de operaciones: 2006/2007 y 2008/2009 Resolución angular: Entre 1 y 2 grados Rango de energías: Entre 10^{17} y 10^{21} eV	Un globo vuela sobre la Antártida durante un mes en busca de emisiones de radio originadas a partir de las colisiones de neutrinos de alta energía contra la capa de hielo.
ASTRONOMIA CON UN TELESCOPIO DE NEUTRINOS E INVESTIGACION DEL ENTORNO ABISAL (ANTARES) Localización: Mar Mediterráneo, cerca de Marsella Volumen del detector: 0,05 km^3 Fecha de operaciones: Desde 2008 Resolución angular: 0,3 grados Rango de energías: Entre 10^{13} y 10^{16} eV	Doce cadenas de fotodetectores en el fondo marino detectan colisiones de neutrinos en el agua. Es uno de los tres proyectos piloto del KM3NeT, un telescopio de neutrinos con un tamaño de un kilómetro cúbico y cuya construcción está programada entre 2011 y 2015.
ICECUBE Localización: Polo Sur Volumen del detector: 1 km^3 Fecha estimada de finalización: 2011 Resolución angular: Entre 1 y 2 grados Rango de energías: Entre 10^{11} y 10^{21} eV	Ochenta y seis cadenas de detectores sensibles a la luz (y en algunos casos, antenas de radio) se introducen en las profundidades del hielo. Es la versión a gran escala de AMANDA, un experimento anterior.
OBSERVATORIO ESPACIAL DEL UNIVERSO EXTREMO (EUSO) Localización: Estación Espacial Internacional Volumen del detector: 1.000.000 km^3 de aire (equivalente a 1000 km^3 de hielo) Fecha estimada de finalización: 2015 Resolución angular: Entre 1 y 2 grados Rango de energías: Entre 10^{19} y 10^{21} eV	Un telescopio ultravioleta del Módulo Experimental Japonés rastreará la atmósfera terrestre en búsqueda de trazas de partículas dotadas de carga eléctrica.

¿QUE SABOR DE NEUTRINO ERA?

Cada tipo o "sabor" de neutrino (electrónico, muónico o tauónico) libera su partícula respectiva (un electrón, un muon o una partícula tau). Sus huellas luminosas permiten distinguir el sabor del neutrino con un margen de error del 25 por ciento.



El electrón interactúa con los átomos y descarga su energía en forma de luz. El volumen irradiado es prácticamente esférico.



El muon, al interaccionar menos, viaja un kilómetro o más y genera un cono de luz.



La partícula tau se desintegra con rapidez. Su creación y desaparición generan dos esferas (un "doble *bang*") de luz.

David L. Wark; Investigación y Ciencia, junio de 2003].

Otro ejemplo lo constituyen los neutrinos generados en las capas altas de la atmósfera terrestre. Allí, los rayos cósmicos colisionan con los núcleos atómicos y generan ciertas partículas inestables denominadas piones, que, a su vez, se desintegran en neutrinos electrónicos y muónicos. A medida que atraviesan la atmósfera y el planeta, el sabor de estos neutrinos oscila. Así, cuanta más distancia hayan recorrido antes de ser detectados, más neutrinos muónicos se habrán convertido en tauónicos. De ahí que, en un observatorio, el número de neutrinos muónicos procedentes de "abajo" (los que llegan desde el lado opuesto del planeta) es siempre la mitad de los que llegan de "arriba" (directos al suelo desde las capas atmosféricas).

Proporciones curiosas

En astronomía, el sabor es a los neutrinos lo que la polarización es a la luz: una propiedad que codifica información. Al igual que una fuente celeste emite luz con una determinada polarización, también produce neutrinos de ciertos sabores. Así, la información sobre esos sabores permite averiguar qué procesos han tenido lugar en el interior de la fuente. El "truco" consiste en revertir la metamorfosis experimentada por los neutrinos durante su viaje.

Si pudiéramos medir con precisión la energía de un neutrino y cuán lejos ha viajado, sabríamos en qué punto del ciclo oscilatorio se encuentra. Una precisión tal no es accesible hoy en día. Tras haber recorrido enormes distancias, los neutrinos han oscilado tantas veces que no nos es posible rastrear la mezcla de sabores. Pero lo que sí podemos hacer es calcular un promedio estadístico. A partir de un objeto matemático denominado "matriz de propagación del sabor", resulta posible deducir la composición original de una muestra de neutrinos una vez conocida la distribución estadística de sabores observada en un detector (*véase el recuadro* "Metamorfosis de neutrinos").

Se cree que un gran número de neutrinos se genera en colisiones de muy alta energía entre fotones y protones. Las mismas pueden ocurrir en la onda de choque de los remanentes de supernovas, los chorros de partículas producidos por agujeros negros, o en las interacciones entre rayos cósmicos y radiación. Esas colisiones producen piones cargados que se desintegran en muones y neutrinos muónicos. A su vez, los muones se desintegran en electrones, neutrinos muónicos y neutrinos electrónicos. La corriente resultante de neutrinos contiene los distintos sabores en una proporción de 1:2:0, es decir, una parte de ν_e por dos de

La fecundidad de los neutrinos estériles

Durante un tiempo se pensó que los neutrinos podían ser los constituyentes de la misteriosa materia oscura del universo [*véase* "Cuestiones fundamentales de cosmología", por P. Schneider; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 2010]. El problema estriba en que los neutrinos son demasiado ligeros; su masa apenas asciende a la millonésima parte de la del electrón. No obstante, sigue abierta la posibilidad de que la materia oscura se componga de algún tipo de neutrinos aún no observados: los "neutrinos estériles", así denominados ya que serían inertes a los efectos de la fuerza débil. Sólo podrían interaccionar gravitacionalmente.

Podría pensarse que los neutrinos estériles quizá sean imposibles de detectar, pero lo cierto es que podrían dejar improntas muy particulares en determinados objetos celestes. Por ejemplo, es posible que se generen en las explosiones de supernova. Dado que las mismas son asimétricas, un número considerable de neutrinos se emitiría en una dirección privilegiada, con lo que el remanente estelar habría de retroceder en sentido opuesto a cientos de kilómetros por segundo. De hecho, tal retroceso se ha observado y constituye una incógnita desde hace tiempo.

Además, los neutrinos estériles podrían ser inestables y desintegrarse en fotones de rayos X. El Observatorio Chandra descubrió una emisión débil que apuntaba a un neutrino estéril con la centésima parte de la masa del electrón. También la misión de rayos X Suzaku observó una tenue señal que podía interpretarse como procedente de un neutrino estéril. Las desintegraciones de neutrinos estériles también podrían haber ionizado hidrógeno en el universo primitivo o haber contribuido a que el universo primitivo se decantara por la materia en detrimento de la antimateria. Por ahora, sin embargo, no existen indicios suficientes para establecer conclusiones sólidas al respecto.

ν_μ, sin presencia de ν_τ. Según la matriz de propagación, esta razón evoluciona hacia 1:1:1 en el detector. Si un experimento terrestre observase una proporción de neutrinos distinta de 1:1:1, la fuente no podría ser la cadena de desintegraciones del pión.

En otros casos, el pion puede perder energía al chocar con otras partículas o al emitir radiación cuando sigue una trayectoria curva en un campo magnético. Si eso sucede, el muon producto de la primera desintegración se torna irrelevante como fuente de neutrinos de alta energía, por lo que la razón inicial de sabores pasa a ser 0:1:0. La matriz de propagación nos dice que, en la Tierra, la razón observada será 4:7:7 (en vez de 1:1:1). Si un experimento detecta una proporción de sabores igual a 1:1:1 para los neutrinos de baja energía, pero de 4:7:7 para los más energéticos, puede calcularse la densidad de partículas y la intensidad del campo magnético en el lugar de origen.

Los neutrinos también pueden proceder de las fuentes conocidas como "haces beta", que tienen lugar cuando núcleos atómicos de muy alta velocidad intercambian piones o sencillamente se desintegran, dando lugar a un haz de neutrones muy veloces. Estos experimentan una desintegración beta y emiten una corriente pura de electrones y (anti)neutrinos electrónicos con una razón de sabores de 1:0:0. En este caso, los cálculos indican que la proporción detectada en la Tierra es de 5:2:2.

Vemos que, cualquiera que sea la mezcla inicial, las componentes ν_μ y ν_τ siempre llegan a la Tierra en igual número. Esta igualdad (reflejo de una simetría que los físicos aún han de explicar) implica que los neutrinos tauónicos siempre aparecerán en las observaciones, a pesar de que no se conoce ningún proceso astrofísico que los genere.

La proporción de sabores permite discriminar entre diferentes procesos cósmicos mucho mejor que cualquier otro indicio. Junto con los rayos gamma y los rayos cósmicos, los neutrinos delatarán el mecanismo dinámico y las reservas energéticas de las dinamos más potentes de la naturaleza. Lograrán determinar si los procesos cósmicos de aceleración de partículas son puramente electromagnéticos (en los que no se producen neutrinos) o si intervienen en ellos partículas pesadas (en los que sí se generan). Incluso podrían ayudar a resolver uno de los misterios más sobresalientes de la astronomía: ¿cómo se originan los rayos cósmicos de mayor energía? Algunos rayos cósmicos exhiben energías tan elevadas que su origen parece desafiar toda física conocida. Los neutrinos servirían para explorar el interior de cualquiera que resultase ser su fuente.

La astronomía de neutrinos también se muestra apta para investigar otros fenómenos. Se cree que la desintegración de partículas de materia oscura podría generar neutrinos en una razón de 1:1:2, que evoluciona para dar una proporción observada de 7:8:8. De acuerdo con algunas teorías cuánticas de la gravedad, el mismo espaciotiempo "ondula" a escalas microscópicas. Los neutrinos de muy alta energía poseen longitudes de onda muy cortas, por lo que podrían ser sensibles a dichas fluctuaciones. Estas, a su vez, volverían a mezclar los sabores de acuerdo a una razón observada de 1:1:1. En el futuro, medidas diferentes a 1:1:1 servirían para descartar algunas de dichas teorías, así como para fijar la escala de energías a la que los efectos de la gravedad cuántica se hacen presentes.

Otro proceso exótico es la desintegración de un neutrino pesado en una variedad más ligera. Ello alteraría la proporción entre sabores. A partir del estudio de los neutrinos solares, se sabe que ν_1 es más ligero que ν_2, pero se desconoce cuál es el neutrino más ligero de todos (si ν_1 o ν_3). Una razón de sabores de 4:1:1 implicaría que los neutrinos son de hecho inestables y que ν_1 es el más ligero de todos; una razón de 0:1:1 querría decir que ν_3 es el más ligero.

Históricamente, la astronomía comenzó con las observaciones del universo en luz visible. Poco a poco fue expandiéndose hacia el infrarrojo, las microondas, las ondas de radio, los rayos X y los rayos gamma. El próximo decenio verá florecer el siguiente paso: la astronomía del neutrino.

JEN CHRISTIANSEN; GEORGE RETSECK (*fuente y Tierra*)

METAMORFOSIS DE NEUTRINOS

Al contrario que otras partículas, los neutrinos se transforman cuando viajan a través del espacio. Para estudiar las propiedades de la fuente, los astrónomos deben reconstruir su estado inicial.

IDENTIDADES EN CONFLICTO

El neutrino posee una extraña capacidad para mutar como consecuencia de sus "múltiples identidades". Puede adoptar uno de tres sabores y una de entre tres masas posibles, pero un sabor concreto no implica una masa determinada, ni viceversa.

EL SABOR determina cómo interactúa la partícula con la materia.

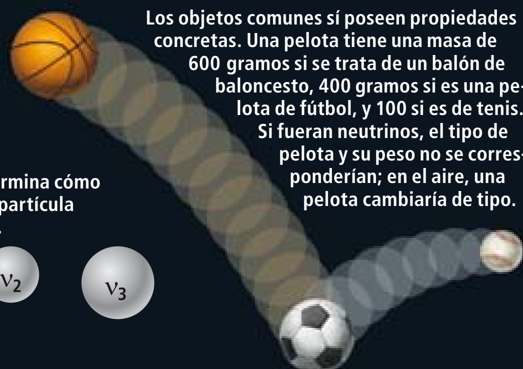


Neutrino electrónico | Neutrino muónico | Neutrino tauónico

LA MASA determina cómo se propaga la partícula por el espacio.

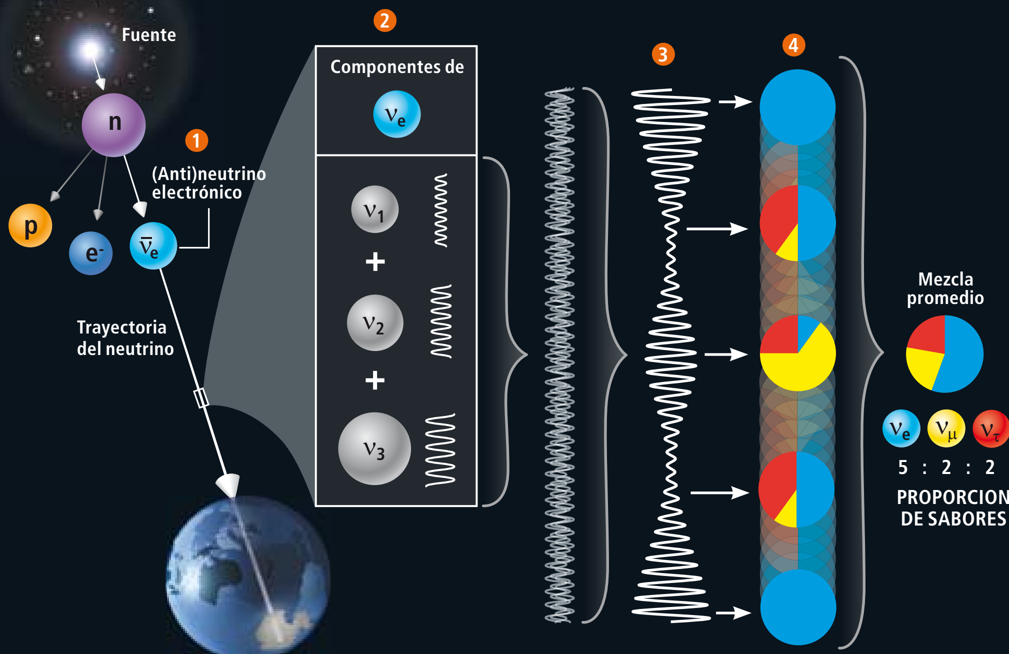


Los objetos comunes sí poseen propiedades concretas. Una pelota tiene una masa de 600 gramos si se trata de un balón de baloncesto, 400 gramos si es una pelota de fútbol, y 100 si es de tenis. Si fueran neutrinos, el tipo de pelota y su peso no se corresponderían; en el aire, una pelota cambiaría de tipo.



OSCILACIONES DE SABOR

Cuando es creado o detectado, el neutrino tiene un sabor determinado. La desintegración beta de un neutrón genera un (anti)neutrino electrónico (1). Este neutrino no posee una masa definida, sino que se trata de una superposición de los tres estados de masa posibles, representados aquí como la suma de tres ondas de diferente frecuencia (2). A medida que el neutrino se propaga, las ondas se desfasan, por lo que no volverán a combinarse en el mismo sabor original, sino en una mezcla de los tres sabores posibles (3). Esa mezcla varía a lo largo del viaje del neutrino (4). Aquí la mezcla promedio es 5:2:2, lo que significa que el detector tiene una probabilidad de cinco novenos de observarla como un neutrino electrónico, y de dos novenos como un neutrino bien muónico o bien tauónico.



MEZCLAS DE SABORES

Los procesos astrofísicos generan mezclas reconocibles de sabores. Tras tener en cuenta las oscilaciones, los astrónomos pueden deducir la composición estadística de la muestra de neutrinos en el lugar de origen a partir de la composición medida en la Tierra. Los neutrinos muónicos y tauónicos llegan siempre en iguales proporciones, una consecuencia de una simetría intrínseca.

Fuente	Razón en origen (ν_e:ν_μ:ν_τ)	Razones en tierra (ν_e:ν_μ:ν_τ)
Desintegración del neutrón	1:0:0	5:2:2
Desintegración (completa) del pion	1:2:0	1:1:1
Desintegración (incompleta) del pion	0:1:0	4:7:7
Desintegración de la materia oscura (una de las posibilidades)	1:1:2	7:8:8
"Espuma" del espaciotiempo	Cualquiera	1:1:1
Desintegración del neutrino (ν_1 es el más ligero)	Cualquiera	4:1:1
Desintegración del neutrino (ν_3 es el más ligero)	Cualquiera	0:1:1

Algunos rayos cósmicos exhiben energías tan elevadas, que su origen parece desafiar toda física conocida. Los neutrinos servirían para explorar el interior de cualquiera que resultase ser su fuente.

Bibliografía complementaria

FLAVOR RATIOS OF ASTROPHYSICAL NEUTRINOS: IMPLICATIONS FOR PRECISION MEASUREMENTS. Sandip Pakvasa, Werner Rodejohann y Thomas J. Weiler en *Journal of High Energy Physics*, artículo n.º 5; 1 de febrero de 2008. **arxiv.org/abs/0711.4517**

HIGH ENERGY COSMIC RAYS. Graciela B. Gelmini en *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 171, n.º 1, artículo n.º 012012; 29 de junio de 2009.

STERILE NUTRINOS: THE DARK SIDE OF THE LIGHT FERMIONS. Alexander Kusenko en *Physics Reports*, vol. 481, n.os 1-2, págs. 1-28; septiembre de 2009. **arxiv.org/abs/0906.2968**

KILOMETER-SCALE NEUTRINO DETECTORS: FIRST LIGHT. Francis Halzen. Presentado en el simposio CCAPP de 2009. **arxiv.org/abs/0911.2676**



El poder terapéutico de nuestras células

La reprogramación de células del propio organismo para dotarlas de la pluripotencia de las células madre embrionarias abriría nuevas vías de tratamiento y evitaría ciertas controversias

KONRAD HOCHEDLINGER

BRYAN CHRISTIE DESIGN

CONCEPTOS BASICOS

- Las células madre pluripotentes inducidas son células maduras del organismo manipuladas para que pierdan la identidad y regresen a un estado similar al embrionario, sin necesidad de recurrir a óvulos o embriones.
- El rejuvenecimiento de las células maduras de cualquier individuo (y su posterior conversión en alguno de los 220 tipos celulares humanos) permitiría desarrollar nuevos tratamientos y personalizar el trasplante de tejidos.
- En la actualidad, se estudian los mecanismos empleados por esas células novedosas para atrasar su reloj biológico; se analiza si su potencial será equiparable al de las células embrionarias.

Recuerdo mi excitación cuando, una mañana de invierno de 2006, observé en el microscopio de mi laboratorio una colonia de células con el mismo aspecto de las células madre embrionarias. Se apiñaban en un pequeño montón, tras haberse dividido en una placa de Petri durante casi tres semanas. Y brillaban gracias a los marcadores fluorescentes cromáticos, fenómeno que caracteriza a la "pluripotencia" de las células embrionarias (su capacidad de originar cualquier tipo de tejido en un organismo). Pero las células que estaba observando no procedían de ningún embrión: eran células normales de un ratón adulto que, al parecer, habían rejuvenecido tras la adición de un sencillo cóctel de genes.

¿Podía en verdad resultar tan fácil dar marcha atrás al reloj interno de una célula de mamífero y hacerla retroceder a un estado embrionario? Además de nuestro grupo, otros se planteaban la misma cuestión. El equipo de Shinya Yamanaka, de la Universidad de Kyoto, acababa de publicar unos resultados importantes en agosto de 2006. Describían la fórmula para crear lo que denominaron células madre pluripotentes inducidas (CMPI) a partir de células cutáneas de ratones. Durante años, los investigadores habían venido esforzándose por comprender y aprovechar el enorme potencial de las células madre embrionarias para generar tejidos adaptados a cada persona, a la vez que hacían frente a las controversias políticas y éticas en torno a la utilización de embriones, a los reveses científicos y a las falsas esperanzas generadas por ese "gran descubrimiento". De ahí que los científicos se mostraran sorprendidos y algo escépticos ante los resultados del grupo japonés. Pero aquella mañana pude comprobar, de primera mano, los resultados de la aplicación de la fórmula de Yamanaka.

Otros grupos reprodujeron más tarde su logro y, a lo largo de los últimos años, han surgido técnicas perfeccionadas para generar y poner a prueba las CMPI. Hoy en día, miles de expertos de todo el mundo estudian el potencial de las CMPI para ayudarnos a comprender y tratar enfermedades humanas hasta ahora incurables, como la diabetes de tipo 1, el alzheimer y la enfermedad de Parkinson.

A lo largo de la historia, la humanidad ha soñado en descubrir la fuente de la eterna juventud y evitar así las consecuencias del envejecimiento y la enfermedad.

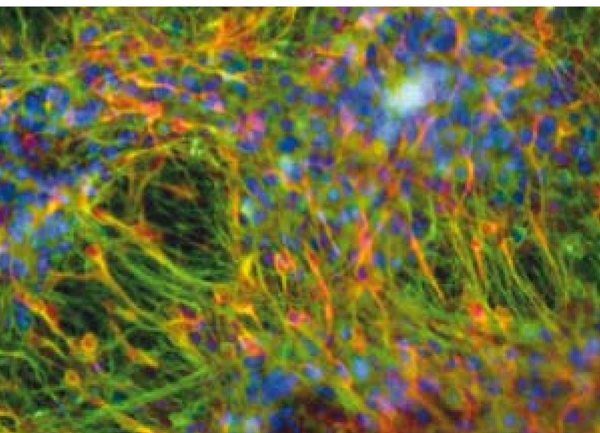
La posibilidad de cambiar la identidad de una célula con tan sólo suministrarle unos pocos genes seleccionados también ha transformado el concepto de desarrollo humano.

A lo largo de la historia, se ha soñado en descubrir la fuente de la eterna juventud y evitar las consecuencias del envejecimiento o la enfermedad. Conseguir que una célula adulta del organismo regrese a un estado embrionario nos hace pensar lo cerca que estamos de convertir esa fantasía en realidad. Por supuesto, la técnica se encuentra aún en sus albores. Hay que resolver muchas cuestiones importantes antes de saber si las CMPI transformarán la práctica médica o equivaldrán a las controvertidas células madre embrionarias.

Poder primordial

Para comprender la esperanza que despertó el descubrimiento de las CMPI, hay que recordar qué es lo que hace tan especiales a los embriones. Los estudios actuales sobre las CMPI se basan en gran medida en técnicas y conceptos desarrollados con células embrionarias en los últimos 30 años, en particular el fenómeno de la pluripotencia. Por lo general, el desarrollo de los mamíferos avanza en un solo sentido. Sus células experimentan un proceso de diferenciación, es decir, con el tiempo se vuelven cada vez más especializadas y menos versátiles. Sólo durante un breve espacio de tiempo, muy al inicio del desarrollo, poseen todas las células de un embrión la capacidad para convertirse en alguno de los 220 tipos de células del cuerpo humano. Al extraer esas células y hacerlas crecer en un medio de cultivo, se generan células madre embrionarias. La pluripotencia hace referencia a la capacidad de las células madre embrionarias de originar por tiempo indefinido cualquier tipo de tejido.

En las etapas tardías de un embrión, las células madre ya están especializadas, hasta el punto de que únicamente pueden dar lugar a una familia específica de tipos celulares, por ejemplo, osteocitos o miocitos. Esas células se consideran histoespecíficas, ya han dejado de ser pluripotentes. En un adulto, de esos precursores quedan tan sólo las células madre adultas, cuya función es reemplazar las células maduras de un tejido. Las células madre hematopoyéticas regeneran sin cesar los 12 tipos de células sanguíneas e inmunitarias; las células madre cutáneas se



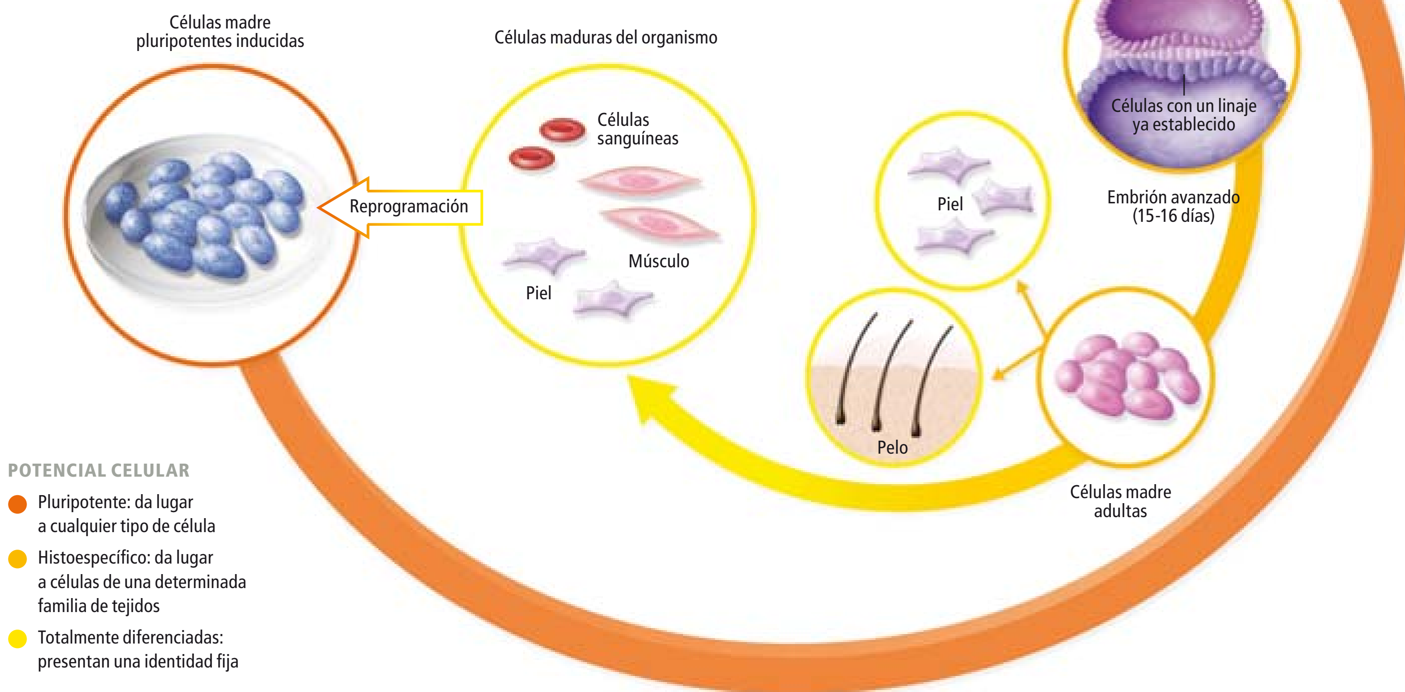
PROMESA TERAPEUTICA

Neuronas (*imagen*) derivadas de células pluripotentes inducidas formadas a partir de células cutáneas de pacientes con la enfermedad de Parkinson. La posibilidad de tomar una célula madura del organismo, hacerla retroceder hasta un estado embrionario y luego convertirla en el tipo de tejido que se desee permitirá grandes avances: estudiar el origen de diversas enfermedades, desarrollar y llevar a cabo ensayos con fármacos que mitiguen la enfermedad y, en última instancia, fabricar tejidos sanos de repuesto con fines terapéuticos.

CORTESIA DE HYESOO KIM Y LORENZ STUDER *Instituto Sloan-Kettering*

Un reloj biológico

Cuando el cuerpo humano se desarrolla, las posibles identidades de una célula se van restringiendo con el tiempo y el grado de especialización, aunque las células madre pluripotentes inducidas (CMPI) parecen romper esa norma. Normalmente, sólo las células de un embrión incipiente son pluripotentes, es decir, tienen la capacidad de convertirse en cualquier tipo celular del organismo adulto. Más tarde, las células del embrión dan lugar a linajes cuyo desarrollo se limita a familias específicas de tejidos: son células histoespecíficas. En el organismo adulto, las células madre están aún más especializadas. Las células maduras del cuerpo se han diferenciado por completo y presentan una identidad fija. La reprogramación hace retroceder el reloj interno de las células maduras y las revierte a un estado pluripotente.



encargan de que la piel se renueve y el cabello crezca en unas pocas semanas.

En condiciones normales, una célula de un mamífero nunca experimenta desdiferenciación, es decir, no puede regresar a un estado más primitivo. De hecho, la única excepción a esa regla son las células cancerosas, que pueden volverse menos diferenciadas que las células del tejido de procedencia. Por desgracia, algunas células cancerosas siguen dividiéndose una y otra vez, mostrando una inmortalidad semejante a la de las células pluripotentes.

Hasta hace poco, la única forma de dar marcha atrás al reloj biológico de una célula adulta era la reprogramación celular, una serie de complicadas manipulaciones que conseguían engañarla y hacían que se comportara como una célula embrionaria. La estrategia más antigua de reprogramación consiste en la transferencia de núcleos de células somáticas, o "clonación": se inyecta material genético de una célula adulta a un óvulo cuyo ADN se ha eliminado; el híbrido ADN-óvulo da lugar a un embrión del que se extraen, en su primera fase de desarrollo, células madre pluripotentes.



CLONACION

La transferencia de un núcleo de una célula madura a un óvulo es otro método para reprogramar el ADN de una persona adulta y revertirlo a un estado embrionario. Hasta la fecha, los intentos por obtener células madre embrionarias a partir de clones de embriones humanos han fracasado por motivos que se desconocen.

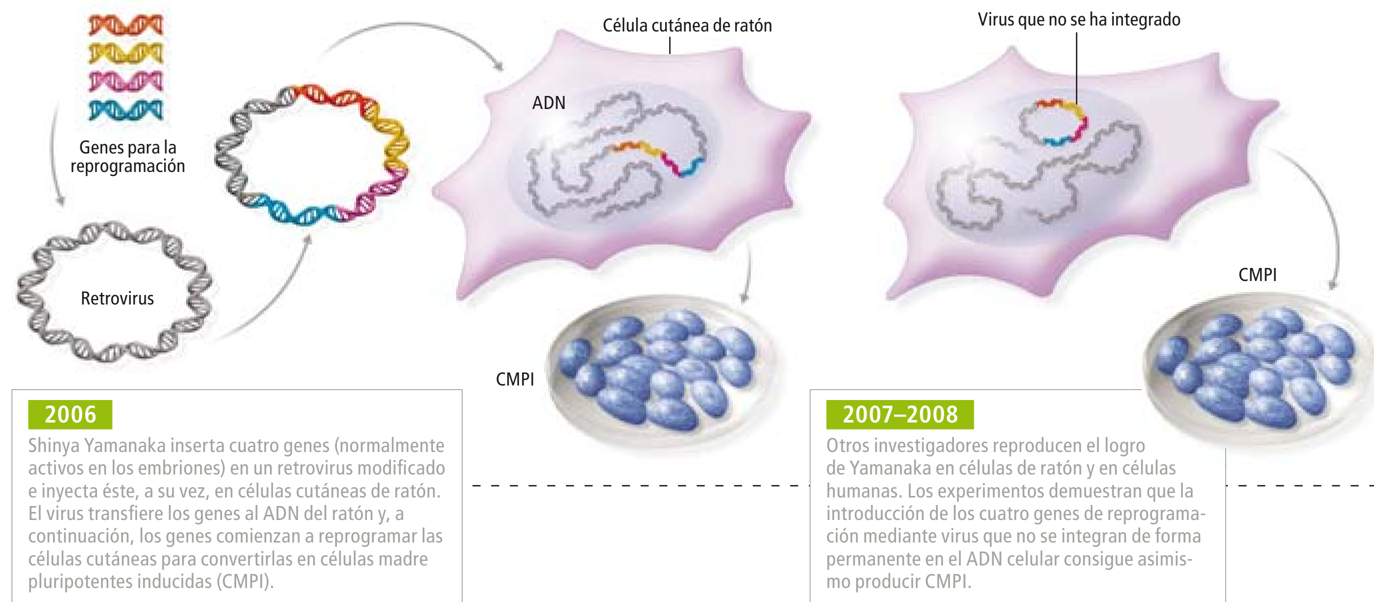
Después de darse a conocer la clonación de la oveja Dolly en 1997 y el aislamiento de las primeras células madre embrionarias humanas en 1998, la transferencia de núcleos ha recibido bastante atención. Se ha visto como un posible método para producir células madre pluripotentes personalizadas que permitirían reemplazar cualquier tejido dañado por una herida o una enfermedad. Algunos factores internos poco conocidos del óvulo parecen rejuvenecer el material genético de la célula adulta donante; incluso los telómeros, los extremos que protegen las regiones terminales de los cromosomas y que se van desgastando con la edad, recuperan un estado juvenil. Sin embargo, a pesar de los progresos realizados con animales, los intentos de producir células madre embrionarias humanas han resultado infructuosos.

Yamanaka y su grupo sortearon ese callejón sin salida mediante una estrategia novedosa. Hicieron que las células adultas se convirtiesen en células pluripotentes sin necesidad de utilizar óvulos o embriones. En vez de inyectar material genético adulto en un óvulo, pensaron que la introducción en una célula

TAMI TOLPA (*ilustración*); PHILIPPE PSAILA *Photo Researchers, Inc.* (*transferencia nuclear*)

Hacia el rejuvenecimiento celular sin riesgos

Hace sólo cuatro años, científicos japoneses demostraron que una serie de genes introducidos por medio de un retrovirus transformaban las células cutáneas de ratones adultos en células madre pluripotentes. Desde entonces, numerosos investigadores han intentado mejorar ese logro y desarrollar una técnica más sencilla, segura y eficaz, condiciones fundamentales para su aplicación terapéutica.

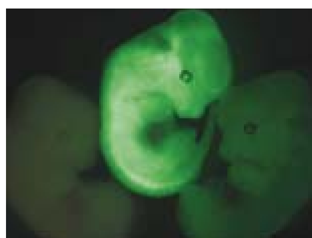


2006
Shinya Yamanaka inserta cuatro genes (normalmente activos en los embriones) en un retrovirus modificado e inyecta éste, a su vez, en células cutáneas de ratón. El virus transfiere los genes al ADN del ratón y, a continuación, los genes comienzan a reprogramar las células cutáneas para convertirlas en células madre pluripotentes inducidas (CMPI).

2007–2008
Otros investigadores reproducen el logro de Yamanaka en células de ratón y en células humanas. Los experimentos demuestran que la introducción de los cuatro genes de reprogramación mediante virus que no se integran de forma permanente en el ADN celular consigue asimismo producir CMPI.

adulta de los genes que se hallaban activos sólo en los embriones bastaría para reprogramar esa célula y hacerla regresar a un estado parecido al embrionario. Su primera proeza consistió en identificar dos docenas de genes activos en las células pluripotentes, pero silenciados en las células adultas. Utilizando retrovirus como vehículos de transporte, transfirieron esos genes a células cutáneas. Una vez allí, casi como por arte de magia, los genes reprogramaron la identidad de las células cutáneas y las dotaron de pluripotencia. En posteriores experimentos, Yamanaka descubrió que, en realidad, hacían falta sólo cuatro genes (*Oct4*, *Sox2*, *Klf4* y *c-Myc*) para producir CMPI.

Más tarde, varios laboratorios independientes, incluido el nuestro, reprodujeron con éxito esos resultados. Se confirmó la base biológica del proceso. Hasta la fecha, se han reprogramado alrededor de una docena de tipos de células adultas de cuatro especies distintas (ratones, humanos, ratas y monos) y, sin duda, este número aumentará. El descubrimiento de las CMPI resulta muy estimulante, ya que permite soslayar las complejidades técnicas de la clonación y evitar la mayoría de las restricciones éticas y legales asociadas a la investigación con embriones humanos. Sin embargo, el nuevo tipo de células pluripotentes no está exento de obstáculos. En la actualidad, al mismo tiempo que se describen esas células y su capacidad de acción, se presta especial atención a los aspectos de seguridad y control de calidad de las CMPI.



ANALIZAR EL POTENCIAL DE LAS CELULAS

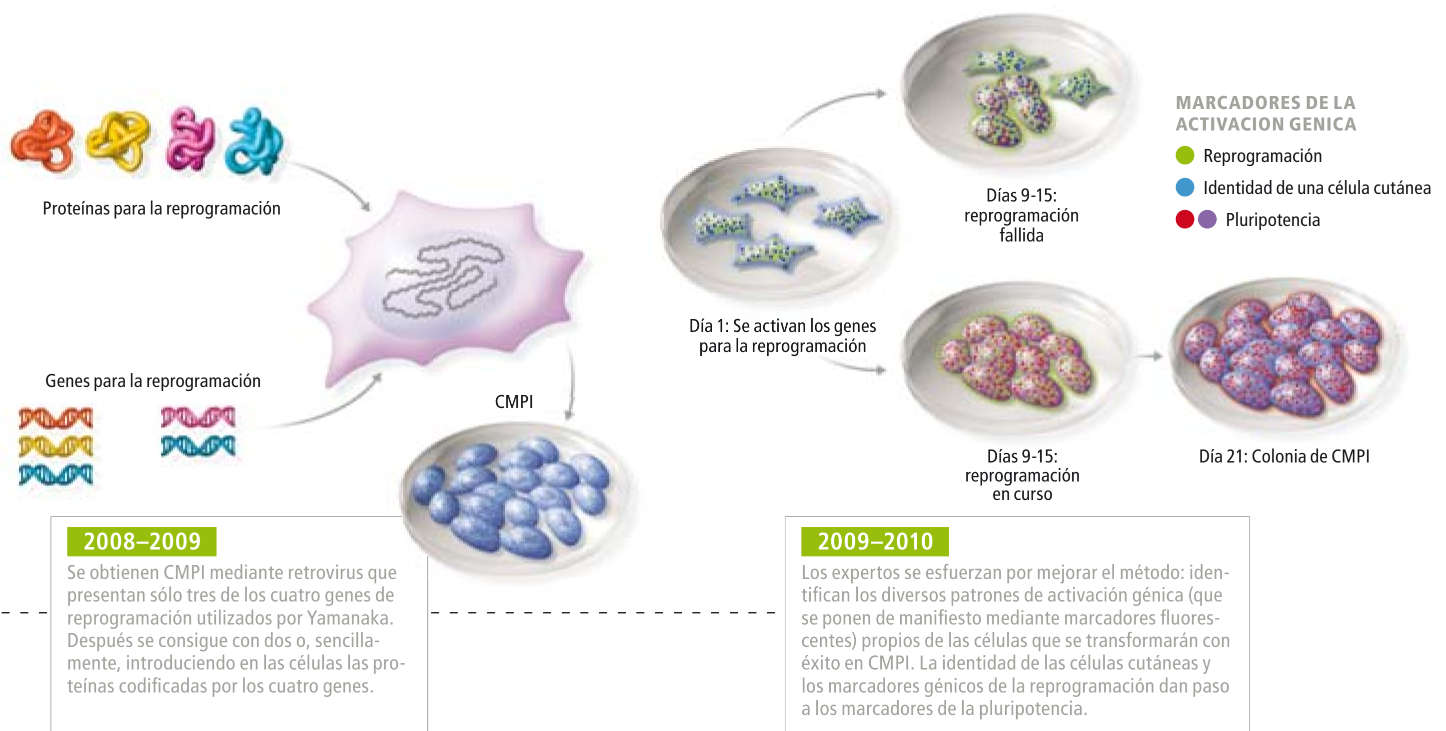
Los análisis de referencia acerca de la pluripotencia de las células madre sirven para demostrar su capacidad de originar cualquier tipo de tejido del organismo. Por ejemplo, tras inyectarse en un embrión incipiente de ratón, las células pluripotentes marcadas con fluorescencia deberían integrarse por todo el cuerpo del ratón en desarrollo (*verde brillante*). Un objetivo importante consiste en descubrir métodos alternativos para verificar la pluripotencia de las CMPI humanas.

Crisis de identidad

Aunque, observadas al microscopio, las colonias de CMPI se parezcan a las células madre embrionarias y presenten marcadores moleculares asociados a las células pluripotentes, la prueba inequívoca de su pluripotencia se obtiene mediante ensayos funcionales: ¿equivale la capacidad de esas células a la de una célula pluripotente propiamente dicha? Las colonias de células embrionarias pueden contener algunas células inútiles, es decir, sin la pluripotencia que les caracteriza. De modo que se han desarrollado ensayos sistemáticos para calibrar la pluripotencia de una célula madre. Ordenados de mayor a menor rigurosidad, éstos consisten en determinar en las células varios parámetros: la capacidad de producir una amplia gama de tipos celulares en una placa de Petri, una vez expuestas a los estímulos apropiados; la capacidad de formar un teratoma (un tipo de tumor que contiene células de todos los linajes de tejidos embrionarios) cuando se inyectan debajo de la piel de un ratón; y, tras inyectarse en un embrión incipiente de ratón, la capacidad de desarrollar en el múrido recién nacido todos los linajes tisulares (incluidas las células germinales).

Mientras que las células madre embrionarias suelen superar las pruebas mencionadas, muchas CMPI no lo hacen. Un análisis más detallado de estas últimas ha revelado que los virus utilizados para transferir a las células cutáneas los cuatro genes clave de la reprogramación no se desactivan correctamente. Además, algunos genes importantes del ADN

TAMI TOLPA (*ilustración*); CORTESIA DE ALEXANDER MEISSNER *Universidad de Harvard* Y MARIUS WERNIG *Universidad de Stanford* (*embrión de ratón*)



2008–2009

Se obtienen CMPI mediante retrovirus que presentan sólo tres de los cuatro genes de reprogramación utilizados por Yamanaka. Después se consigue con dos o, sencillamente, introduciendo en las células las proteínas codificadas por los cuatro genes.

2009–2010

Los expertos se esfuerzan por mejorar el método: identifican los diversos patrones de activación génica (que se ponen de manifiesto mediante marcadores fluorescentes) propios de las células que se transformarán con éxito en CMPI. La identidad de las células cutáneas y los marcadores génicos de la reprogramación dan paso a los marcadores de la pluripotencia.

original de la célula no se activan de manera adecuada. El resultado es la formación de células que han perdido su identidad cutánea sin haber adquirido la pluripotencia. Por lo tanto, las células parcialmente reprogramadas no reúnen las características de las auténticas células pluripotentes.

Las pruebas de pluripotencia pretenden diferenciar una CMPI "apropiada" de otra "defectuosa". Así, el grupo de Thorsten Schlaeger y George Daley, de la Universidad de Harvard, ha identificado hace poco un patrón de actividad génica en las células cutáneas durante el largo proceso (unas tres semanas) de adquisición de la pluripotencia. Los marcadores fluorescentes que exhiben las células en esa transición permiten distinguirlas de otras células de la misma colonia que no se transformarán en CMPI. Por tanto, la configuración de los marcadores podría servir a modo de indicador precoz del cambio de identidad.

Debido a que, por razones éticas, se prohíbe llevar a cabo la prueba de pluripotencia más rigurosa, consistente en inyectar CMPI a embriones humanos, es fundamental asegurar que las CMPI humanas cumplen con los demás criterios de pluripotencia. Se debe garantizar así el silenciamiento total de los virus potencialmente dañinos empleados para introducir los genes de reprogramación. El equipo de Yamanaka descubrió que una tercera parte de los embriones de ratones a los que se había inyectado CMPI, de adultos padecieron cáncer como consecuencia de la actividad residual del retrovirus.

El autor

Konrad Hochedlinger es profesor de biología regenerativa y de las células madre en la Universidad de Harvard e investigador del Instituto Harvard de Células Madre y del Instituto Médico Howard Hughes. En su laboratorio del Hospital General de Massachusetts, estudia la biología de las células madre y de la reprogramación celular, con su posible aplicación terapéutica. También es asesor científico de iPierian, compañía biofarmacéutica que desarrolla productos basados en células madre.

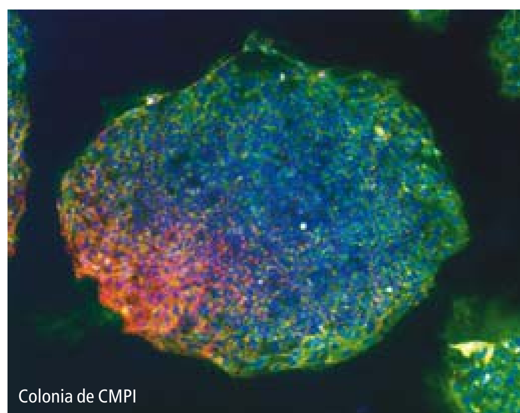
Uno de los principales problemas del uso de retrovirus (por ejemplo, el VIH) como vectores génicos es que éstos se integran de inmediato en una de las hebras del ADN de la célula huésped; se convierten en parte de su genoma. Esta propiedad permite que los genes añadidos residan y permanezcan activos en la célula huésped. Pero dependiendo de dónde se inserte el virus, causará daños en el ADN e inducirá cambios cancerosos en la célula. Por tanto, en un esfuerzo por obtener CMPI más inocuas, múltiples laboratorios han desarrollado métodos que eviten la modificación genética permanente de las células.

Nuestro grupo utilizó un tipo modificado de adenovirus (causante del resfriado común en los humanos) para introducir en células de ratón los cuatro genes de reprogramación sin que se integraran en el genoma celular. Los adenovirus persistían en las células un corto espacio de tiempo, el justo para convertirlas en CMPI. Cuando inyectamos a embriones de ratón las células pluripotentes resultantes, éstas se incorporaron de inmediato en los animales; ninguno de ellos presentó tumores en la edad adulta. Este descubrimiento, junto con otras estrategias para generar CMPI sin utilizar virus, debería eliminar uno de los mayores obstáculos de la aplicación terapéutica de las CMPI en humanos.

A la larga, los investigadores esperan producir CMPI sin recurrir a los virus, simplemente exponiendo las células adultas a una combinación de fármacos que imiten el efecto de los genes de reprogramación. Sheng Ding, del

Células personalizadas para curar enfermedades

La capacidad para transformar las células cutáneas o sanguíneas en CMPI y, posteriormente, en cualquier otro tipo de célula podría curar enfermedades de dos maneras: en un futuro muy cercano, permitiría desarrollar modelos de enfermedades y ensayar medicamentos en una placa de Petri; y quizá dentro de una década, se podría reparar o sustituir tejidos enfermos.


Colonia de CMPI

APLICACION	ESTADO DE DESARROLLO
MODELO DE ENFERMEDAD Convertir las CMPI derivadas de los pacientes en el tipo de tejido afectado; estudiar después en esas células la progresión de la enfermedad y la respuesta ante ciertos fármacos	■ Las CMPI humanas ya se han utilizado para generar 12 tipos de tejido, incluidas las células representativas de diversas patologías, como la enfermedad de Parkinson o la diabetes ■ Se han "tratado" los síntomas de la atrofia muscular espinal y de la disautonomía familiar en cultivos de células
TERAPIA CELULAR Convertir las CMPI derivadas de un paciente en células sanas que luego se trasplantarán al mismo individuo	■ De aquí a 10 años o más ■ En ratas: se han reimplantado neuronas derivadas de CMPI para tratar una variante de la enfermedad de Parkinson ■ En ratones: las células precursoras de la sangre derivadas de CMPI, en las que se han reparado los genes causantes de la anemia falciforme, han curado la enfermedad

Instituto de Investigación Scripps, Douglas A. Melton, de Harvard, y otros ya han identificado compuestos que sustituyen a los cuatro genes de reprogramación. Cada compuesto activa una ruta de interacciones moleculares en el interior de una célula, función desempeñada de otro modo por los genes. Sin embargo, cuando se han ensayado las cuatro sustancias juntas no se ha logrado generar células pluripotentes. Sólo es cuestión de tiempo que los investigadores den con la combinación eficaz de fármacos y sus concentraciones adecuadas para reprogramar las células del organismo y convertirlas en CMPI, sin necesidad de recurrir a los virus.

Capacidad terapéutica

Como las células pluripotentes permiten generar cualquier tipo de tejido en el organismo, la aplicación con la que más se especula es que sirvan de repuesto de células u órganos dañados a causa de una enfermedad (neuronas destruidas por parkinson o una lesión medular, o tejido cardíaco dañado por ataque al corazón). Si se convirtieran células adultas del supuesto receptor de ese tipo de trasplante en células pluripotentes y se consiguiera transformarlas luego en el tejido deseado, la parte sustituida encajaría a la perfección, desde un punto genético e inmunológico, en el organismo del receptor. Y no sólo eso, las células cutáneas, fáciles de obtener, podrían utilizarse para producir cualquier tipo de célula según la necesidad, incluidas las de órganos y tejidos de difícil acceso, como el cerebro o el páncreas.

Esta técnica ofrece también la posibilidad de reparar mutaciones genéticas patógenas antes de reimplantar las células modificadas, estrategia que ya se ha utilizado con las células madre adultas generadas de forma espontánea por algunos tejidos. Sin embargo, el éxito ha sido limitado, porque esas células precursoras son especialmente difíciles de cultivar y manipular fuera del organismo.

Experimentos recientes realizados con ratones indican la viabilidad de tratar los trastornos genéticos con CMPI. Rudolf Jaenisch, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, demostró en 2007 que las CMPI podían curar la anemia falciforme de un animal. La enfermedad está causada por una mutación genética en la que los eritrocitos adoptan la forma de media luna. En este estudio demostrativo preliminar, los investigadores reprogramaron células cutáneas de ratones para dotarlas de pluripotencia. A continuación, sustituyeron en ellas el gen causante de la enfermedad por una versión sana del mismo. Consiguieron que las células "reparadas" se transformasen en células madre precursoras de las células sanguíneas. Tras reimplantarlas en los ratones anémicos, las células precursoras sanas produjeron eritrocitos normales. En principio, este método sería aplicable a cualquier enfermedad humana provocada por una mutación genética conocida.

La gran pregunta es: ¿cuándo servirán las CMPI para tratar a los humanos? Por las razones que ya se han comentado, antes de ensayar en el hombre cualquier célula derivada de las CMPI, debe garantizarse la seguridad y el control de la técnica. Las estrategias actuales para obtener células maduras totalmente diferenciadas a partir de células madre embrionarias o CMPI aún no eliminan de modo eficaz las escasas células madre inmaduras que podrían originar un tumor. La magnitud de ese problema se ha puesto de manifiesto en un experimento reciente en el que se implantaron CMPI derivadas de neuronas dopaminérgicas (células destruidas en la enfermedad de Parkinson) en ratas que sufrían una versión de la



DUDAS ETICAS

La inyección de CMPI en un embrión de ratón da lugar a un animal híbrido (*arriba*) que delata la presencia de células foráneas por la mezcla de colores de su pelaje. En teoría, la misma técnica permitiría crear un embrión humano híbrido; e igualmente, las CMPI podrían generar espermatozoides y óvulos para producir un embrión humano con las técnicas tradicionales de fecundación *in vitro*. Por tanto, la pluripotencia de las CMPI plantearía algunas cuestiones éticas idénticas a las que suscita la investigación con embriones humanos.

CORTESIA DE WILLIAM COLLINS *Deepak Srivastava Lab, Instituto de Enfermedades Cardiovasculares de Gladstone (iPSC)*; CORTESIA DE KONRAD HOCHEDLINGER Y MATTHIAS STADTFELD *Hospital General de Massachusetts (ratón)*

enfermedad humana. Aunque las ratas demostraron una mejora notoria gracias a las células injertadas, con el tiempo aparecieron teratomas en el cerebro de algunos de los animales.

No obstante, a la vista del ritmo acelerado de los descubrimientos, ese tipo de obstáculos podría superarse en tan sólo un decenio. Para entonces, el trasplante de células derivadas de las CMPI podría empezar a ensayarse en humanos. Pero también es muy posible que las CMPI demuestren su valor terapéutico mucho antes. El estudio y tratamiento de múltiples enfermedades degenerativas, como la diabetes de tipo 1, el alzheimer o la enfermedad de Parkinson, se encuentra limitado por la imposibilidad de obtener los tejidos afectados y analizarlos o cultivarlos durante un tiempo prolongado. Por tanto, las CMPI podrían ser de enorme utilidad para el desarrollo de modelos de enfermedades".

La idea consiste en obtener CMPI a partir de células sanguíneas o cutáneas del paciente y, a continuación, convertirlas en los tipos celulares implicados en la enfermedad. En fecha reciente, Clive N. Svendsen, de la Universidad de Wisconsin-Madison, y Lorenz Studer, del Instituto Sloan-Kettering, produjeron CMPI a partir de células de pacientes con trastornos devastadores: atrofia muscular espinal y disautonomía familiar. Cuando las CMPI se transformaron en los tipos celulares afectados por cada una de esas enfermedades, las células cultivadas reproducían las mismas anomalías observadas en los pacientes.

El proceso permitiría a los investigadores estudiar la evolución de una enfermedad en una placa de Petri, con la ventaja de disponer siempre de células nuevas, ya que las CMPI iniciales se pueden mantener indefinidamente. En última instancia, los científicos académicos y las compañías farmacéuticas pretenden utilizar los modelos obtenidos en placas de Petri para comprender mejor la enfermedad e identificar nuevos fármacos para combatirla.

Tal prometedora aplicación de las CMPI no es en absoluto remota. De hecho, cuando Svendsen y Studer expusieron sus cultivos celulares a fármacos experimentales en sus respectivos estudios, los "síntomas" de la enfermedad se aliviaron de forma parcial en las células. El principio puede servir ahora a otras enfermedades que carecen de tratamiento y, a diferencia del reimplante de células en individuos, se desarrollarían fármacos que podrían beneficiar a millones de personas.

Desafíos y esperanzas

Aunque, sin duda las CMPI soslayan algunas de las controversias éticas y legales en torno a las células embrionarias, aún falta comprender o controlar por completo su pluripotencia. Por tanto, las células madre embrionarias continúan siendo el criterio de referencia de cualquier tipo de célula pluripotente.



CELULAS A LA VENTA

El primer producto comercializado que se ha fabricado a partir de CMPI humanas consiste en una línea de células cardiacas, denominada iCell Cardiomyocytes. Se pretende que las compañías farmacéuticas ensayen los efectos de posibles medicamentos para el corazón.

Una de las cuestiones importantes pendientes de carácter práctico es saber si la técnica de convertir células del organismo en CMPI y transformar estas últimas en tipos celulares con efecto terapéutico llegará a ser lo suficientemente eficaz como para generalizar su aplicación.

También queda por resolver si las CMPI conservan algún recuerdo sobre el tipo celular de procedencia, un factor que podría limitar su pluripotencia. Se han descrito los mecanismos que intervienen en el paso de una célula madura a otra pluripotente. Pero el proceso de reprogramación, la forma en que unos pocos genes consiguen remodelar el programa de una célula madura y cambiarlo por el de una célula embrionaria, sigue representando una gran incógnita.

Abordar esas cuestiones exigirá el uso continuado de células embrionarias como criterio de referencia. Se podrá determinar así si las células madre embrionarias resultan más eficaces en ciertas aplicaciones y las CMPI en otras. Por otra parte, en calidad de células pluripotentes, las CMPI pueden suscitar cuestiones éticas parecidas a las que plantean las células embrionarias porque, al menos en teoría, las CMPI podrían utilizarse para generar embriones humanos (*véase el recuadro* "Células personalizadas para curar enfermedades").

No obstante, el progreso científico de los últimos años en el campo de la reprogramación celular ha sido espectacular. Los avances en la clonación y, más recientemente, el descubrimiento de las CMPI han refutado el antiguo dogma de la identidad irreversible de las células después de su diferenciación. Ambas técnicas han hecho posible reprogramar la identidad de un tipo determinado de célula del organismo y convertirla en la de otro tipo de tejido con tan sólo manipular un puñado de interruptores genéticos. Desentrañar el mecanismo de esa remodelación servirá de estímulo a los investigadores y los mantendrá ocupados en los años venideros.

Sólo el tiempo demostrará si las CMPI u otras técnicas relacionadas constituirán la futura fuente de la eterna juventud. Personalmente, creo que es muy probable que así suceda. Sin duda las CMPI seguirán considerándose en las estrategias de estudio y tratamiento de numerosas enfermedades devastadoras. Poseen el potencial de revolucionar la medicina del siglo XXI de una manera tan profunda como lo hicieron las vacunas y los antibióticos en el siglo XX.

Bibliografía complementaria

INDUCTION OF PLURIPOTENT STEM CELLS FROM MOUSE EMBRYONIC AND ADULT FIBROBLAST CULTURES BY DEFINED FACTORS. Kazutoshi Takahasi y Shinya Yamanaka en *Cell*, vol. 126, n.º 4, págs. 663-676; 2006.

EPIGENETIC REPROGRAMMING AND INDUCED PLURIPOTENCY. Konrad Hochedlinger y Kathrin Plath en *Development*, vol. 136, n.º 4, págs. 509-523; 15 de febrero, 2009.

INDUCED PLURIPOTENT STEM CELLS AND REPROGRAMMING: SEEING THE SCIENCE THROUGH THE HYPE. Juan Carlos Izpisúa Belmonte, James Ellis, Konrad Hochedlinger y Shinya Yamanaka en *Nature Reviews Genetics*, vol. 10, n.º 12, págs. 878-883; 2009.

➥ Versión multimedia del artículo original en: **http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=interactive-your-inner-healers**



CIEGOS con VISION

En la invidencia por lesión cerebral cabe la posibilidad de la "visión ciega", una extraordinaria facultad de reaccionar ante expresiones faciales e incluso esquivar obstáculos

BEATRICE DE GELDER

El vídeo rodado por mi grupo es asombroso: un invidente recorre un largo pasillo sembrado de cajas, sillas y demás parafernalia de oficina. El sujeto, conocido en el mundo médico como "TN", ignora dónde se hallan los obstáculos. Sin embargo, logra esquivarlos limpiamente, deslizándose aquí con cuidado entre una papelera y la pared, rodeando más allá el trípode de una cámara; todo ello sin ser consciente de sus maniobras. TN es invidente, pero está dotado de "visión ciega", una notable capacidad para responder a los estímulos visuales sin ser consciente de ellos.

La ceguera de TN, provocada por dos accidentes cerebrovasculares sufridos en 2003, es de una rareza extrema. Los infartos lesionaron la corteza visual primaria —una zona situada en el occipucio—, primero en el hemisferio izquierdo, y cinco semanas después, en el derecho. Sus ojos continuaban sanos pero, como su corteza visual ya no recibía las señales que aquellos le enviaban, quedó completamente ciego.

El experimento en el que TN recorre el pasillo sin tropezar constituye probablemente la demostración más impresionante de visión ciega descrita hasta la fecha. Otros pacientes que han perdido la visión por lesiones en la corteza visual primaria han protagonizado ejemplos menos espectaculares, aunque igualmente inexplicables: respondían a estímulos que no podían ver conscientemente, desde figuras geométricas sencillas hasta la compleja imagen de un rostro que expresaba una fuerte emoción. Se ha logrado inducir un efecto similar en sujetos sanos, mediante la "desconexión" temporal de su corteza visual u otras formas de desorientarla.

En nuestros días, los expertos intentan comprender las diversas facultades perceptivas conservadas por los invidentes con lesión cortical, así como determinar las regiones cerebrales y las vías neurales responsables de la visión ciega. Los conocimientos que se están adquiriendo nos conciernen a todos, pues incluso aunque nunca lleguemos a sufrir una lesión similar a la de TN, las funciones inconscientes manifiestas en él —la pasmosa capacidad de ver sin saberlo— constituyen sin duda una parte constante e invisible de nuestra existencia cotidiana.

Una historia controvertida

En 1917 se comunicaron casos semejantes de visión ciega —denominada entonces visión residual— en soldados heridos en la Primera Guerra Mundial. Mas habría de transcurrir medio siglo antes de que se acometiera una investigación más organizada y objetiva. En 1967, Lawrence Weiskrantz y su discípulo Nicholas K. Humphrey, de la Universidad de Cambridge, estudiaron simios modificados mediante cirugía. Más tarde, en 1973, Ernst Pöppel, Richard Held y Douglas Frost, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, midieron los movimientos oculares de un paciente y observaron que tendía a dirigir la mirada hacia estímulos que no veía de forma consciente.

Esos descubrimientos dieron pie a experimentos sistemáticos en animales desprovistos de la corteza visual primaria (V1). Fueron llevados a cabo, en su mayor parte, por el

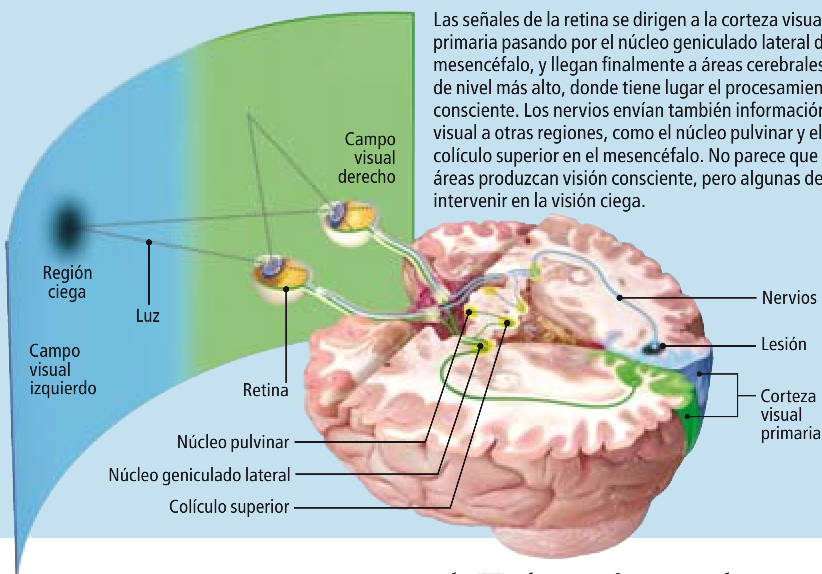
CONCEPTOS BASICOS

- Algunos invidentes afectados por una lesión cerebral exhiben "visión ciega": reaccionan ante objetos e imágenes que no ven de forma consciente.
- La visión ciega permite reconocer bastantes manifestaciones visuales, entre ellas, colores, movimiento, formas sencillas y la emoción expresada por el rostro o el gesto de otra persona.
- Se están cartografiando regiones cerebrales de origen remoto, consideradas responsables de la visión ciega, y se están explorando los límites de esa notable facultad.

DARREN BRAUN

¿En qué consiste la visión ciega?

En el hombre, la visión consciente depende de una región cerebral, la corteza visual primaria (*abajo*). Las lesiones en esa región provocan ceguera en las correspondientes áreas del campo visual. La "visión ciega" se da cuando los pacientes reaccionan ante un objeto presentado en su área ciega, inhabilitada para la visión consciente. En una impresionante demostración de este fenómeno, el paciente "TN" logró recorrer sin tropiezos un pasillo con diversos obstáculos, a pesar de su ceguera total (*derecha*).



VIAS VISUALES

Las señales de la retina se dirigen a la corteza visual primaria pasando por el núcleo geniculado lateral del mesencéfalo, y llegan finalmente a áreas cerebrales de nivel más alto, donde tiene lugar el procesamiento consciente. Los nervios envían también información visual a otras regiones, como el núcleo pulvinar y el colículo superior en el mesencéfalo. No parece que tales áreas produzcan visión consciente, pero algunas deben intervenir en la visión ciega.



ORIENTARSE A CIEGAS

Al suponer que el paciente TN exhibiría visión ciega, los investigadores (entre ellos, Laurence Weiskrantz, a quien vemos detrás de TN) le pidieron que recorriera un pasillo. Le habían comentado que el camino se hallaba despejado, aunque en realidad debía sortear bastantes obstáculos. TN logró esquivarlos todos, pero no se dio cuenta ni de su presencia ni del serpenteante recorrido que realizó.

KEITH KASNOT (*ilustración*); BEATRICE DE GELDER (*fotografía*)

Los pacientes con lesiones en la corteza cerebral que poseen cierto grado de "visión ciega" son más numerosos de lo que se pensaba

grupo de Weiskrantz. Se comprobó que, tras la resección de su corteza visual, los animales retenían facultades visuales importantes, como la detección de movimientos o la discriminación de formas.

En 1973, el grupo de Weiskrantz emprendió también estudios en una persona nombrada "DB", a quien se había extirpado un tumor cerebral y carecía por tanto de una parte de la corteza visual. No obstante, la comunidad científica recibió con gran escepticismo las descripciones sobre la visión ciega en humanos.

Tal incredulidad mal puede sorprender, puesto que el fenómeno contradice la intuición. Después de todo, ¿cómo podría nadie ver sin saber que está viendo? Lo mismo que es absurdo decir que uno no sabe si siente un dolor, tampoco parece tener sentido pensar que una persona ve cuando insiste en que es ciega.

Sin embargo, no siempre nos damos cuenta de que vemos. Ni tampoco somos siempre conscientes de que no vemos. La relación entre visión y conocimiento es más compleja de lo que a menudo se supone. Por ejemplo, los individuos con visión normal poseen un punto ciego, aunque normalmente no tienen constancia de esa deficiencia visual ni sufren minusvalías por ello.

Otro de los factores que ha despertado incredulidad ha sido la escasez de datos en humanos: los casos de ceguera cortical que pueden estudiarse son infrecuentes. La corteza visual primaria se extiende sólo unos centímetros en el humano adulto, y las lesiones cerebrales muy pocas veces están restringidas a esa zona. Aunque el daño cause ceguera, el paciente debe conservar en grado suficiente las restantes facultades cerebrales para poder investigar la percepción residual del cerebro. A pesar de todo, se ha verificado que los pacientes con lesiones en la corteza visual y cierto grado de visión ciega son más numerosos de lo que se pensaba. El escepticismo ha ido remitiendo.

La mayoría de los pacientes conservan cierta funcionalidad en el área visual primaria. En muchos casos se ha dañado sólo una pequeña parte de V1, lo que determina un pequeño islote ciego en su campo visual; otros pierden por completo la mitad derecha o la izquierda de V1, y sufren ceguera en la mitad correspondiente (en el lado opuesto) del campo visual. Esos individuos reconocen objetos o imágenes que se les presenta ante el área ciega, donde no pueden verlos conscientemente.

La metodología tradicional de estudio de la visión en el hombre se fundaba en el relato verbal de su percepción. Examinados así, los pacientes declaran no ver cosa alguna en la región ciega de su campo visual. Sin embargo, métodos menos directos permiten apreciar la influencia real de los estímulos visuales no percibidos de forma consciente.

En algunos experimentos, los pacientes exhiben alteraciones fisiológicas claras, como la constricción de la pupila, signo revelador de visión inconsciente. Los sujetos pueden reaccionar de distinta forma ante determinados elementos situados en el campo visual sano, según el objeto exhibido al mismo tiempo en el campo ciego. Y cuando se les pide que adivinen ese objeto, que deben elegir entre varios, casi siempre responden acertadamente.

Otro recurso experimental importante son los estudios de neuroimagen, que aportan pruebas directas sobre las regiones cerebrales implicadas en la visión ciega y las vías que sigue la información visual. Esa técnica ha permitido disipar la suposición latente de que la visión residual se debería a la existencia de partes no lesionadas en la corteza.

Los distintos tipos de ensayos han revelado nuestra capacidad de reconocer de manera inconsciente una amplia variedad de atributos visuales, entre ellos, el color, formas sencillas (como la X o la O), movimientos simples y la orientación de líneas o enrejados. Las formas de gran tamaño, lo mismo que los detalles finos, parecen difíciles de percibir. Así, los pacientes identifican más fácilmente un enrejado si sus líneas son equiparables a las láminas de una persiana veneciana situada a una distancia de dos a cuatro metros.

La idea de nuestro experimento con TN se inspiró en las investigaciones realizadas por Weiskrantz y Humphrey en los años setenta: un simio, desprovisto de corteza visual primaria, podía desplazarse a su albedrío por un cuarto lleno de objetos sin chocar con ninguno. Aun así, quedamos asombrados cuando TN logró caminar desde un extremo a otro del corredor sin ningún tropiezo. En las pruebas psicofísicas, concebidas para él con el fin de evaluar la posible visión consciente, no se apreció ningún funcionamiento visual, ni siquiera en la detección de objetos grandes.

La habilidad de TN para recorrer el pasillo hacía pensar en el sonambulismo, otro fenómeno en el que los individuos demuestran capacidad para realizar ciertas acciones sin tener conciencia de ellas. De hecho, al interrogar a TN sobre su hazaña, insistió en que se había limitado a recorrer el pasillo. No tenía conciencia de haber visto nada, ni tampoco recordaba cómo había evitado los obstáculos. Le era imposible razonar o incluso describir sus actos.

Visón ciega de las emociones

Una de las tareas básicas que deben resolver los animales es la de desplazarse a un lugar determinado. Tal vez por ello, no debería sorprender que el cerebro dispusiera de otras formas de orientación, en especial cuando la corteza visual primaria y la visión consciente no funcionan. La supervivencia del hombre, en cuanto especie social, depende de la comunicación eficaz con los demás. Debe reconocer a otras personas, así como los gestos y señales de sus pensamientos. Partiendo de esa idea, mi grupo se planteó, a finales de los noventa, si las personas con lesiones corticales podrían detectar en las regiones normalmente inaccesibles de su campo visual ciertas señales, como las emociones plasmadas en un rostro o el significado de una postura corporal.

En 1999, iniciamos ensayos utilizando filmaciones de rostros. Los expertos en visión suelen admitir la complejidad visual de un rostro, mucho más difícil de procesar que los enrejados u otras figuras elementales. A pesar de ello, el cerebro humano percibe los rostros con naturalidad. Nuestro paciente “GY” había perdido en su infancia la corteza visual primaria del hemisferio cerebral izquierdo, y por tanto la mitad derecha de su campo visual estaba incapacitada. Hallamos que podía adivinar con bastante precisión la expresión de rostros que no percibía de forma consciente, si bien demostraba ceguera ante una variedad de atributos faciales sin contenido emotivo, como el sexo o la identidad.

En 2009, al objeto de estudiar mejor la visión ciega de las emociones, nos valimos del llamado contagio emotivo, la tendencia a ajustar en el propio rostro las expresiones faciales que estamos viendo en otras personas. El contagio emotivo se mide con la técnica de la electromiografía facial: mediante electrodos, se registran las señales aferentes a los músculos que se producen al sonreír o enfadarse. Utilizamos la técnica en los pacientes GY y DB, al tiempo que les mostrábamos fotografías de rostros y cuerpos que expresaban felicidad o miedo.

Todos los estímulos suscitaron reacciones emotivas que se reflejaron en las mediciones electromiográficas, con independencia de si se situaban en el lado con visión o en el lado ciego. De hecho, de modo sorprendente, las imágenes invisibles provocaron una respuesta más rápida que las que se veían conscientemente. Examinamos también las dilataciones pupilares, una medida de la activación fisiológica. Las imágenes de carácter aterrador presentadas ante la zona sin visión provocaron la máxima estimulación: al parecer, cuanto más consciente es la percepción de una señal emotiva, tanto más lenta y débil es nuestra reacción.

Cierta corriente de pensamiento sostiene que el contagio emotivo se debe a que las personas tienden a mimetizar de modo incons-

¿QUE SE VE EN LA VISION CIEGA?

La visión ciega es máxima cuando los detalles visuales son del tamaño de un euro observado a una distancia desde uno y medio hasta cuatro metros. Se puede identificar un repertorio de rasgos visuales básicos, entre ellos:

- Formas simples
- Enrejados lineales
- Aparición o desaparición de objetos
- Movimiento
- Color
- Orientación de líneas





LA VISION CIEGA permite reconocer también emociones expresadas por una persona sin por ello identificarla o determinar su sexo.

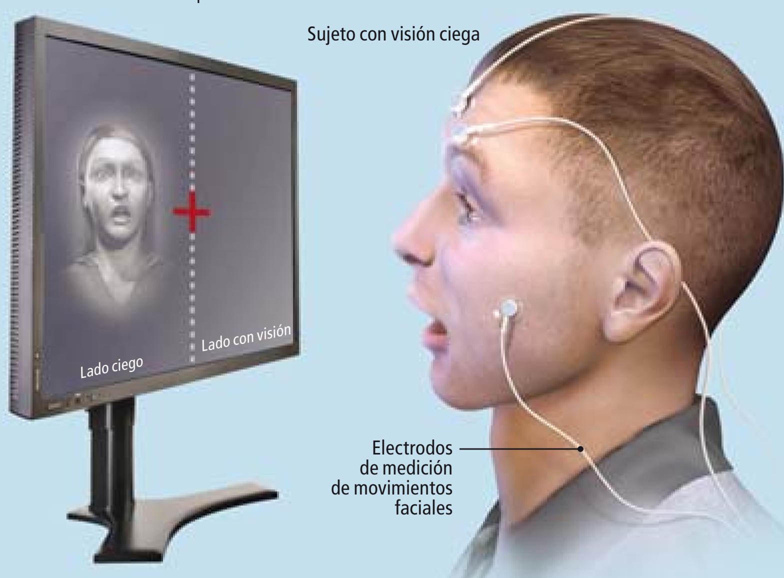
ANTHONY MARSLAND *Getty Images* (*arriba*); GETTY IMAGES (*abajo*)

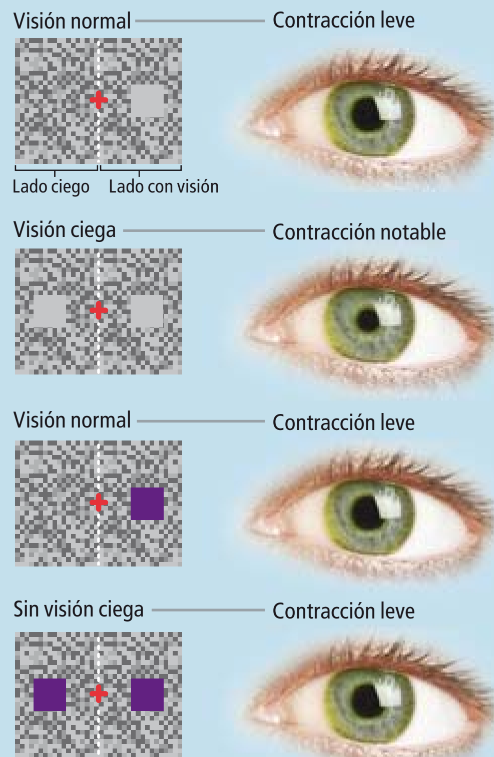
Investigación de la visión ciega

Debido a que la ceguera cortical total, como la del paciente "TN", es muy infrecuente, los estudios sobre visión ciega se efectúan a menudo con individuos incapacitados respecto a uno de los dos lados del campo visual. El sujeto mantiene la mirada sobre un punto fijo mientras se le muestran imágenes a ambos lados. Se le pide que "adivine" el objeto presentado ante su lado ciego o que pulse un botón cuando vea ciertas imágenes en el lado con visión. Con medios adecuados, se supervisa la actividad cerebral y se miden las respuestas involuntarias, como las contracciones faciales leves o la dilatación de las pupilas.

▼ PERCEPCION DE EMOCIONES

Cuando se colocaron ante la zona ciega imágenes expresivas de otras personas, los pacientes casi siempre "adivinaron" la emoción. Los músculos faciales implicados en la sonrisa o en la ira reaccionaron de acuerdo con el tipo de emoción representada en la imagen (*abajo, exagerada*) que no podían ver. Así pues, reconocían emociones sin la intervención de la visión consciente. Cuando se les mostraba expresiones de cuerpos sin rostro, se producía el mismo efecto. Ello indicaba que el sujeto identificaba emociones y no remedaba de forma inconsciente las expresiones faciales.





▲ AREAS CEREBRALES IMPLICADAS

Se enseñó a los pacientes cuadrados de color gris y de color violeta, pues se sabe que el colículo superior, una región del mesencéfalo, no recibe las señales de la retina correspondientes al color violeta. Los pacientes demostraron signos de visión ciega (mayor contracción de las pupilas) ante los cuadrados grises, pero no ante los violetas. Ese hallazgo, junto con las neuroimágenes de los pacientes durante el experimento, hacen pensar que el colículo superior desempeña una función crucial en la visión ciega.

KEITH KASNOT (*experimento y ojos*); LUCY READING-IKKANDA (*cuadrados*)

CARTOGRAFIA DE LAS VIAS NEURONALES

Se utilizan técnicas punteras de neuroimagen para averiguar las vías neuronales recorridas por la información visual en el cerebro durante la visión ciega.

Las imágenes con tensor de difusión constituyen un método de resonancia magnética. Se basa en la difusión del agua, más rápida al contornear las neuronas que al atravesarlas.

Esta técnica ha permitido identificar haces de neuronas que pudieran ser responsables de la visión ciega de las emociones. Esa vía nerviosa conecta el núcleo pulvinar y el colículo superior con la amígdala, que desempeña una función clave en el procesamiento de las emociones.

ciente las expresiones de otros, sin necesidad de reconocer la emoción concreta. Pero como nuestros pacientes reaccionaban no sólo ante los rostros sino también ante las expresiones corporales (que tenían rostros borrosos), concluimos que podían percibir la emoción y responder a ella.

Visión ciega en todos

Dado el escaso número de pacientes idóneos para el estudio de la visión ciega, un medio valioso para llevar a cabo experimentos controlados consiste en la inducción temporal del fenómeno en personas sanas. Una de las técnicas es el "enmascaramiento" visual mediante el empleo de imágenes subliminales. Se ofrece muy brevemente al sujeto un estímulo visual y, acto seguido, se enseña en la misma ubicación una figura o escena completamente distinta a la anterior. La segunda figura interfiere en el procesamiento de la fugaz imagen subliminal; aunque el sujeto no tiene conciencia de haberla visto, los experimentos demuestran la visión objetiva de la misma. Otras pruebas se basan en la técnica de la estimulación magnética transcraneana, en la que se inutiliza temporalmente la corteza visual mediante la aplicación de campos magnéticos en el occipucio.

Numerosos estudios han revelado que los individuos sanos pueden adivinar con bastante precisión la naturaleza de un estímulo, aunque su tiempo de exhibición sea insuficiente para percibirlo o a pesar de la desactivación de la corteza visual mediante la estimulación magnética transcraneana. Se ha investigado en profundidad la reacción de personas sanas ante estímulos visuales emocionales que no pueden ver de modo consciente. Con anterioridad a esos experimentos de visión ciega, algunos estudios realizados en animales y en humanos ya habían indicado que las estructuras subcorticales (zonas del cerebro más profundas y evolutivamente más antiguas que la corteza) pueden iniciar respuestas adecuadas al estímulo antes de ser analizado en detalle por otras zonas como la corteza visual. Ese sistema inconsciente parece operar en paralelo con las vías normales de procesamiento, en su mayoría corticales. Se piensa que, en los sujetos con ceguera permanente, las áreas subcorticales activadas por estímulos emocionales

subliminales son las principales responsables de la elaboración de las emociones en la visión ciega.

Se sigue debatiendo, empero, si las formas efímeras de visión ciega inducidas en individuos sanos equivalen funcionalmente a la visión ciega de los pacientes con lesiones corticales permanentes. En concreto, las técnicas de enmascaramiento visual permiten que la corteza visual procese la información del modo habitual, pero impiden su elaboración posterior consciente. Así pues, la visión ciega de imágenes subliminales constituiría un fenómeno distinto al de la visión ciega de los sujetos lesionados e involucraría a un conjunto concreto de regiones cerebrales. Seguramente la estimulación magnética transcraneana remeda con mayor exactitud las lesiones corticales; pero para averiguar si en la visión ciega así provocada intervienen las mismas vías neuronales deben llevarse a cabo experimentos que combinen esa técnica con los estudios de neuroimagen.

A la inversa, pudiera suceder que, tras una lesión, el cerebro del paciente (en edad adulta, incluso) estableciera nuevas conexiones para compensar la pérdida. Esa plasticidad neuronal permitiría crear vías para la visión ciega en las personas con visión normal sometidas a ensayos de estimulación magnética transcraneana o enmascaramiento visual. Mientras no se comprendan mejor esas cuestiones, los estudios de pacientes seguirán siendo cruciales para dilucidar la función de las regiones subcorticales en la visión ciega.

Vías neuronales

Todavía no se han determinado por completo las estructuras nerviosas responsables de la visión ciega en los afectados por una lesión cortical. Pero entre las más probables se incluye el colículo superior (CS), una región cerebral que se asienta en una parte de la subcorteza, el mesencéfalo. En los animales no mamíferos, como las aves y los peces, el CS constituye la principal estructura receptora de las señales procedentes de los ojos. En los mamíferos está eclipsado por la corteza visual, aunque sigue participando en el control de los movimientos oculares, entre otras funciones visuales. La visión ciega podría aprovechar informaciones que viajan desde la retina hasta el CS sin pasar antes por la corteza visual primaria.

El año pasado, mi grupo demostró que esa región mesencefálica resulta esencial para traducir en acción los estímulos visuales imposibles de percibir de forma consciente. En concreto, indicamos a un paciente que pulsara un botón cada vez que se le mostraba un cuadrado en el lado con visión. En ocasiones le presentábamos al mismo tiempo un cuadrado en su lado ciego. Los cuadrados eran a veces de color gris, y otras, de color violeta. Elegimos un tono violeta que sólo era detectado por un tipo específico de cono en la retina. Sabíamos que el CS no recibía señales de ese tipo. Era ciego respecto a ese color.

Un cuadrado gris expuesto en el lado ciego de nuestro paciente aceleraba su respuesta y provocaba una mayor contracción de sus pupilas (signo de procesamiento del estímulo), mientras que un cuadrado morado no ejercía ni uno ni otro efecto. Dicho de otro modo: exhibía visión ciega ante los estímulos grises, pero no ante los violáceos. En las imágenes cerebrales se apreciaba la activación máxima del CS sólo cuando el estímulo gris se situaba en el lado ciego. Se ha supuesto la participación de otras regiones del mesencéfalo en la visión ciega, en lugar del CS, pero en nuestro experimento la actividad de éstas no parecía guardar relación con la visión ciega.

Los hallazgos dan a entender que el CS actúa en el cerebro humano a modo de interfaz entre la elaboración sensorial (la vista) y el procesamiento motor (que suscita una acción en el paciente). Contribuye así a una conducta visual basada en una vía independiente de la corteza, y es totalmente ajena a la experiencia visual consciente. En la visión ciega de las emociones expresadas por otra persona interviene también el CS, así como ciertas regiones del mesencéfalo, como la amígdala.

La visión ciega ha despertado especial interés en los filósofos, intrigados por la paradójica idea de que se pueda ver sin ser consciente de ello. Obviamente, el concepto tan sólo resulta paradójico si se considera que la "visión" equivale siempre a una "visión consciente". Este prejuicio ha obstaculizado la aceptación por los científicos de la visión ciega y ha frenado el estudio de la función de la visión inconsciente en la cognición humana.

Y también constituye un escollo para quienes sufren ceguera por una lesión cortical, impidiéndoles aprovechar en su vida cotidiana las posibles facultades de visión residual. TN se considera invidente, y no prescindirá de su bastón blanco hasta que se le convenza de su capacidad de visión. Puede que el entrenamiento ayude a esas personas. Al cabo de tres meses de estimulación diaria, los pacientes con lesión cortical identificaron mejor los objetos situados en su campo ciego. La cuestión de si el entrenamiento en condiciones reales ayudaría a promover la capacidad de orientación, así como otros aspectos de la visión ciega, deberá esclarecerse en futuras investigaciones.

La autora

Beatrice de Gelder es profesora de neurociencia cognitiva y directora del laboratorio de neurociencia cognitiva y afectiva en la Universidad de Tilburg. Es también docente del centro de investigación de imágenes biomédicas Athinoula A. Martinos, en Charleston, Massachusetts. De Gelder estudia los aspectos neurológicos del procesamiento de rostros y emociones, y las interacciones entre cognición y emoción en cerebros sanos y lesionados.

Bibliografía complementaria

AFFECTIVE BLINDSIGHT. Beatrice de Gelder y Marco Tamietto en *Scholarpedia*, vol. 2, n.º 10, págs. 3555; 2007.

UNSEEN FACIAL AND BODILY EXPRESSIONS TRIGGER FAST EMOTIONAL REACTIONS. Marco Tamietto et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 106, n.º 42, págs. 17.661-17.666; 20 de octubre, 2009.

COLLICULAR VISION GUIDES NONCONSCIOUS BEHAVIOR. Marco Tamietto et al. en *Journal of Cognitive Neuroscience*, vol. 22, n.º 5; págs. 888-902; mayo de 2010.

Matrioscas de la evolución

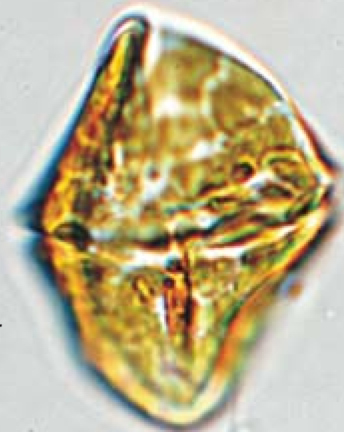
Rosa Isabel Figueroa y Esther Garcés

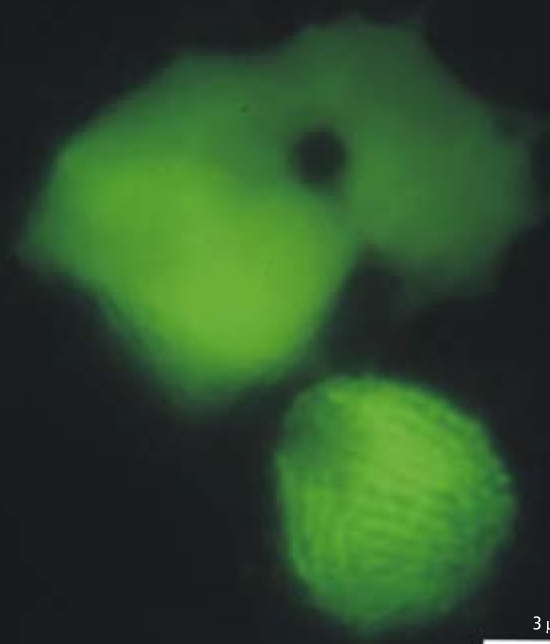
Kriptoperidinium foliaceum es una microalga unicelular típica de ambientes marinos y estuarinos. Como en casi todos los dinoflagelados (grupo al que pertenece), sus células son haploides. Se dividen mediante mitosis y pueden reproducirse sexualmente, formando quistes de resistencia que se depositan en el sedimento. Sin embargo, la estructura celular de esta microalga llama especial atención: en lugar de un núcleo, posee dos. ¿De dónde proviene el segundo núcleo? ¿Por qué presentan un aspecto diferente? ¿Desempeña cada núcleo una función distinta?

Las dos primeras preguntas tienen una respuesta clara. La tercera es todavía objeto de estudio. Uno de los núcleos corresponde al propio dinoflagelado; el otro, a una diatomea endosimbionte que se ha incorporado de modo permanente en el dinoflagelado. Se puede diferenciar uno de otro porque los núcleos de los dinoflagelados poseen una característica distintiva: sus cromosomas siempre son visibles durante la división mitótica y meiótica. En cambio, el núcleo de la diatomea se comporta como el de una célula eucariota típica, con cromosomas no visibles en la interfase. Los mecanismos de regulación de los núcleos y la función específica del núcleo endosimbionte constituyen todavía un misterio. Pero se sabe que ambos núcleos pueden efectuar de forma coordinada la división mitótica y la fusión sexual.

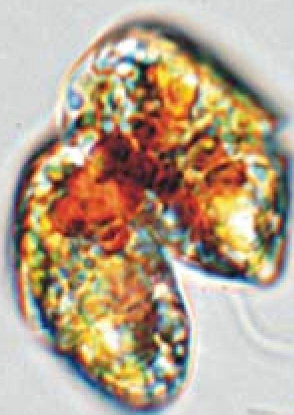
Más allá de esa originalidad fisiológica, la de una célula que alberga en su interior a otra, *K. foliaceum* ofrece una oportunidad única de observar un mecanismo evolutivo incompleto: la cesión de información genética de un organismo a otro.

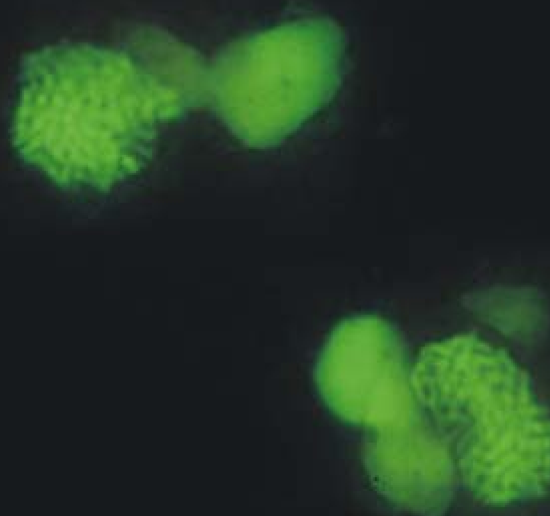
1. Proliferación de un dinoflagelado en la zona costera.





2. Célula de *K. foliaceum*. A la derecha, se observan los dos núcleos: el superior pertenece a la diatomea endosimbionte y el inferior, al dinoflagelado (con morfología estriada por la condensación de los cromosomas).

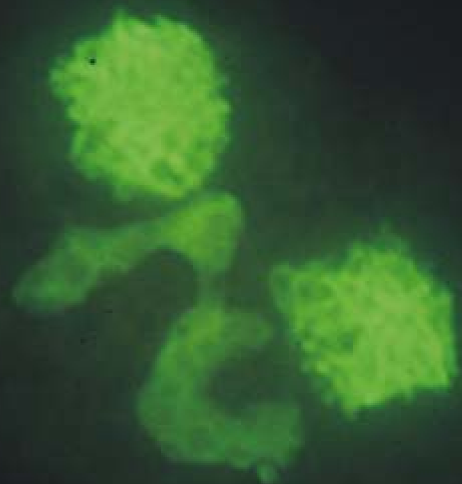




3. Mitosis (división vegetativa). Los dos núcleos se replican de forma casi simultánea (*derecha*).

4. Fusión de dos gametos de *K. foliaceum*. Los núcleos se unen dos a dos, aunque los endosimbiontes se fusionan antes (*derecha*).





J. CAMP Y AGENCIA CATALANA DEL AGUA (*página opuesta*); FIGUEROA ET AL., PROTIST 160:285-300; 2009 (*ilustraciones de esta página*)

Recuperar el equilibrio con oídos biónicos

Los implantes electrónicos en el oído interno podrán, algún día, restablecer la visión clara y el equilibrio en pacientes que sufren inseguridad discapacitante

Charles C. Della Santina

Para la mayoría de la gente, los sentidos corporales se limitan a los cinco clásicos: vista, oído, olfato, gusto y tacto. Ni siquiera sospechan que existe un sexto sentido: la sensación de orientación y movimiento de la propia cabeza. Si esta capacidad se pierde, sobreviene un terrible vértigo paralizador, seguido por una inseguridad crónica y una visión borrosa cuando la cabeza se mueve. Afortunadamente, se está avanzando mucho en el desarrollo de implantes de oídos biónicos que restablezcan el equilibrio en las personas con daños en el laberinto vestibular del oído interno, del cual proviene nuestro sexto sentido.

Para comprender la necesidad de estas prótesis, examinemos el caso de Richard Gannon, un montador de calderas de 57 años, jubilado, con casa en Pennsylvania y Florida. Hace siete años, Gannon perdió gran parte de su sensación de equilibrio tras una enfermedad en apariencia vírica. Ahora clama por ser el primero en recibir un implante vestibular, al cabo de cinco años de espera.

Al jubilarse, se mudó a una casa junto al mar —había sido un gran nadador—. Pero desde que perdió el equilibrio se queja de que no puede caminar en línea recta, sobre todo en la arena. Las madres apartan de él a los hijos, porque creen que está borracho. Apenas conduce, y nunca de noche, porque cada faro se le multiplica por 20. Aunque de día todavía se vale, por la noche las luces desfilan ante sus ojos como estelas de un cometa o rayos láser de un espectáculo. Con gusto dejaría de oír si con ello recuperara el equilibrio, asegura.

Los recientes progresos en audición biónica permiten abrigar esperanzas a Gannon y a decenas de miles de individuos que, como él, han aguantado lesiones en el oído interno infligidas por ciertos antibióticos (como la gentamicina) o quimioterapias, o bien debidas a meningitis, enfermedad de Ménière u otras dolencias.

Mantenerse erguido y firme

Muy parecido a los implantes cocleares, que restauran la audición por medio de la estimulación eléctrica de partes del nervio auditivo, este nuevo tipo de oído biónico proporciona estabilidad mediante la estimulación eléctrica del nervio vestibular que normalmente transmite al cerebro las señales procedentes del laberinto vestibular. La conexión eléctrica del dispositivo al nervio evitará el paso por el sistema vestibular defectuoso.

El laberinto vestibular sano desempeña dos funciones importantes. La primera, distinguir entre arriba y abajo, y determinar hacia dónde nos dirigimos. Esa información es necesaria para estar de pie y caminar con normalidad. La segunda consiste en percibir el modo de rotación de la cabeza, lo que nos permite mantener la vista en el objeto. Siempre que giramos la cabeza hacia arriba, por ejemplo, el laberinto ordena a los ojos que giren hacia abajo exactamente a la misma velocidad, de modo que las imágenes se mantengan estables

CONCEPTOS BASICOS

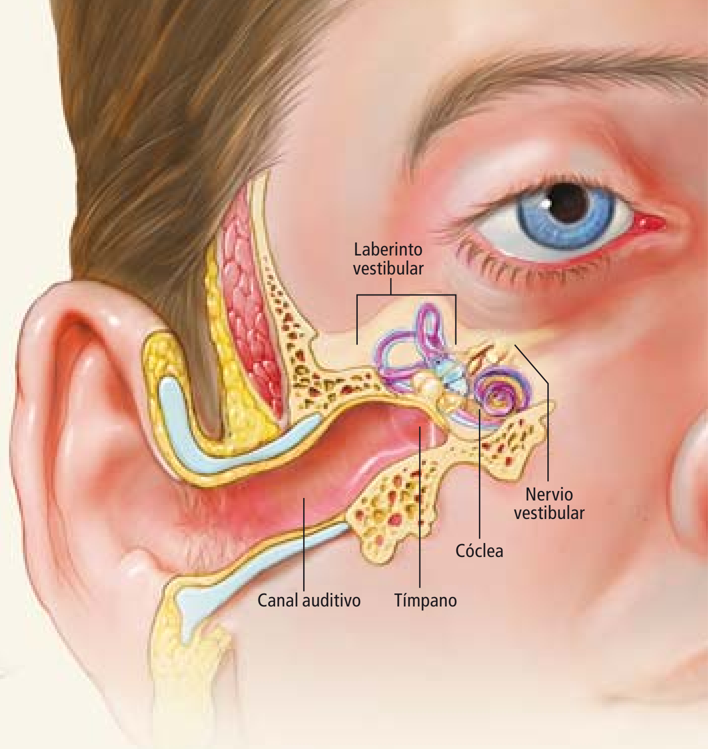
- Los trastornos del sistema vestibular del oído interno producen vértigo y visión temblorosa y confusa.
- Tres estructuras semicirculares del oído interno son responsables de calibrar la rotación de la cabeza.
- Están en desarrollo unas prótesis que sustituirían la función de los canales semicirculares y, de ese modo, restablecerán el equilibrio.

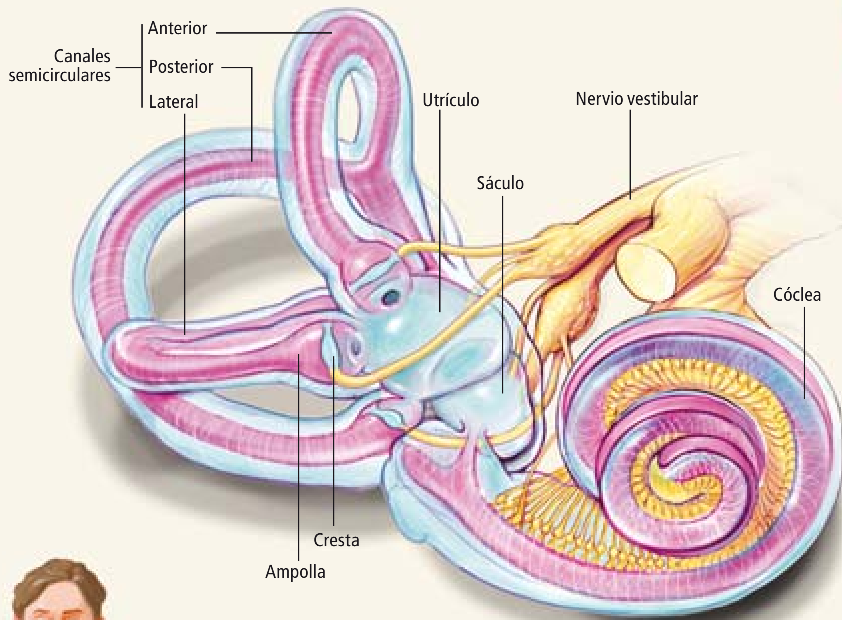
GERARD SLOTA



Dispositivo recuperador del equilibrio

El laberinto vestibular del oído interno, de intrincada estructura, desempeña una función esencial en el equilibrio; sus lesiones provocan inseguridad y visión borrosa. Se avanza en el desarrollo de una prótesis que compensará esos daños, de modo muy parecido a los implantes cocleares para las pérdidas de audición.



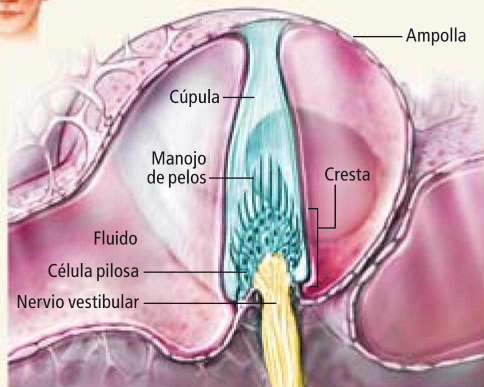


◄ OIDO INTERNO: NO SIRVE SOLO PARA OIR

El laberinto vestibular comprende tres conductos llenos de fluido, los canales semicirculares. Cada uno presenta en su extremo una estructura denominada ampolla. Estas ampollas detectan la rotación de la cabeza en las tres dimensiones y, al igual que otros sensores del oído interno, se valen de células especializadas que traducen a impulsos nerviosos el movimiento del fluido en los canales. Otras estructuras del laberinto (utrículo y sáculo) comunican al cerebro cuál es la orientación de la cabeza con respecto a la atracción de la gravedad. La prótesis del autor sustituiría la función de los canales semicirculares.



CABEZA FIJA



◄ SEGUIR AL FLUIDO

Cuando la cabeza está fija, permanece en reposo el fluido de cada canal semicircular y las fibras del nervio vestibular se excitan a un ritmo constante (*arriba*). Durante la rotación de la cabeza (*abajo*), el fluido de cada canal semicircular lateral forma una cúpula (una membrana flexible a través del canal). Las células pilosas traducen este movimiento a señales eléctricas, retransmitidas por las fibras a otras partes del cerebro. Tales impulsos provocan reflejos que hacen girar los ojos en dirección opuesta a la cabeza, de modo que sigan mirando al mismo sitio. Ello ayuda a mantener el equilibrio.

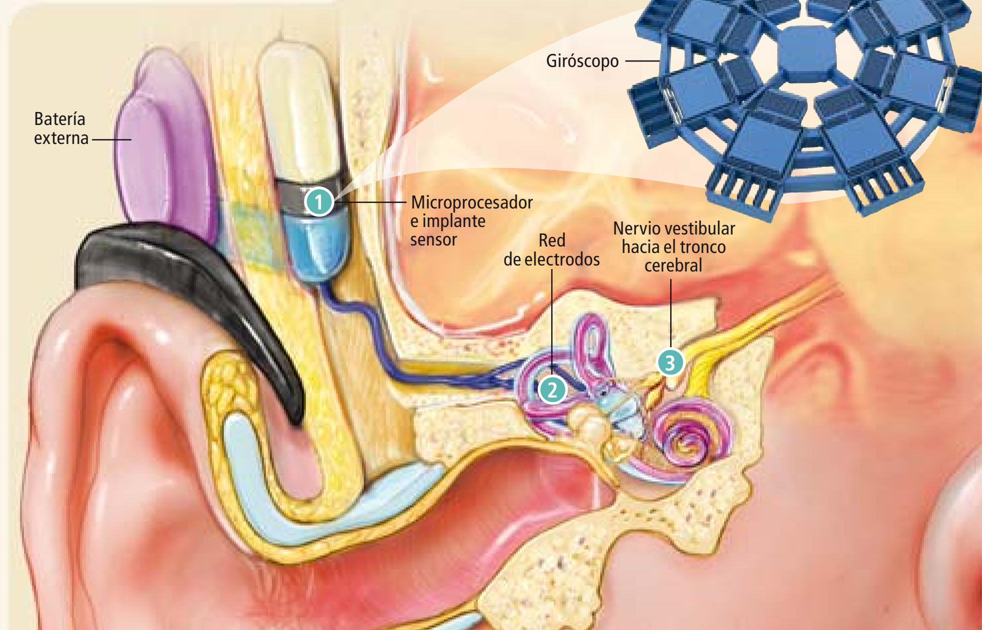


CABEZA EN ROTACION



▼ DESVIO ELECTRONICO EQUILIBRADOR

La prótesis en proyecto utilizaría un giróscopo en miniatura para detectar la rotación de la cabeza, reemplazando a las estructuras defectuosas del oído. El giróscopo se aloja en una unidad implantada detrás del oído y consiste en una rueda vibradora microelectromecánica (realizada con la clase de fotolitografía que se aplica a los microchips). Al moverse la cabeza, la rueda se desvía ligeramente, con lo que modifica la tensión en los condensadores inmediatos que encierra el dispositivo 1. Uno de los microprocesadores del giróscopo detecta el cambio y envía señales a los electrodos insertados en el oído interno 2, que retransmiten la información al nervio vestibular 3, de ahí al tronco cerebral y, por fin, a los nervios que ajustan la posición de los ojos.



en la retina. Si este reflejo vestíbulo-ocular no existiera, veríamos el mundo como una película tomada por una temblorosa videocámara de mano. Las prótesis en proyecto vendrían a reemplazar dicho reflejo, con lo que restablecerían en gran parte, aunque no del todo, el equilibrio perdido.

El laberinto vestibular calibra la rotación de la cabeza por medio de tres canales semicirculares, conductos llenos de fluido que por su forma recuerdan los aros del hula-hoop. Estos canales, residentes en cada oído, forman ángulos rectos entre sí con el fin de poder registrar la rotación de la cabeza en las tres dimensiones espaciales.

En cada oído hay un canal que calibra la rotación en el plano, por ejemplo, horizontal. Al girar la cabeza hacia la izquierda, el fluido interior del canal presiona sobre una membrana que se estira a través de un extremo del conducto y provoca la flexión de unas proyecciones de aspecto piloso (cilios) en unas células embutidas en la base de la estructura. La flexión de los cilios se traduce en señales transmitidas por los nervios vestibulares hacia el tronco cerebral y el cerebelo. Estos últimos son los centros de la percepción sensorial y el control motor, que envían mensajes a los músculos para hacer girar los ojos en dirección opuesta a la rotación de la cabeza.

Desvío equilibrador

Nuestro grupo del Laboratorio de Neuroingeniería Vestibular Johns Hopkins ha desarrollado y ensayado en animales uno de los implantes de tanto interés para Gannon. Se trata de un giróscopo (micromecánico) miniaturizado que mide el movimiento de la cabeza en tres dimensiones; su microprocesador asociado envía señales a unos electrodos que estimulan las tres ramas del nervio vestibular. La electrónica y las técnicas de detección sensorial utilizadas en más de 120.000 implantes cocleares durante los últimos 25 años servirán para apuntalar esta nueva generación de implantes neuronales, con lo que facilitarán la transición desde el campo investigador al uso clínico.

De ordinario realizamos el implante solamente en un lado, con intención de limitar a un solo oído los riesgos quirúrgicos, es decir, posibles lesiones a estructuras del oído interno que intervienen en la audición. Nuestras pruebas con animales nos permiten creer que una prótesis que suplante la función de un conjunto de canales semicirculares aportará suficiente estabilidad y equilibrio a un paciente con trastornos vestibulares. Quizá pudiera también restaurarse la función de las estructuras sensoras de la gravedad en el oído interno, pero no sería necesario corregir la borrosidad visual que tanto irrita a quienes han perdido la función del oído interno.

Además del trabajo desarrollado en el Johns Hopkins, también en otros centros se desarrollan implantes vestibulares. Daniel Merfeld, Wangsong Gong y su grupo del Hospital del Ojo y el Oído de Massachusetts (MEEI, de "Massachusetts Eye and Ear Infirmary") en Boston anunciaron en 2000 la primera prótesis: un dispositivo que servía para sustituir a uno de los tres canales semicirculares; demostraron luego que los animales se adaptaban a recibir señales del implante. Richard Lewis, también del MEEI, estudia si el dispositivo puede estabilizar la postura.

En fecha más reciente, un grupo dirigido por James O. Philips, de la Universidad de Washington, ha creado una suerte de marcapasos que pretende superar la anormal descarga nerviosa que se produce durante un ataque de vértigo provocado por la enfermedad de Ménière. Les apoyan Andrei M. Shkel, de la Universidad de California en Irvine, y Julius Georgiou, de la Universidad de Chipre, con su trabajo en circuitos integrados. Y otro grupo más, el de Conrad Wall, en el MEEI, desarrolla dispositivos externos que ayudan a mantener una postura estable.

Conscientes del trastorno que padecen Gannon y otros pacientes similares, nuestro grupo del Johns Hopkins espera iniciar las pruebas clínicas tan pronto como se hayan superado las restantes barreras técnicas y legales. Si la investigación progresa según lo previsto, al fin todas estas personas podrán recuperar la sensación de equilibrio, el sexto sentido.



EL PRIMER VOLUNTARIO para implantar la prótesis es Richard Gannon, antiguo montador de calderas que hace siete años quedó discapacitado tras sufrir una enfermedad.

ILUSTRACIONES DE ANDREW SWIFT (*página opuesta*); CORTESIA DE RICHARD GANNON (*Gannon*)

El autor

Charles C. Della Santina es profesor asociado de otorrinolaringología e ingeniería biomédica en la Escuela de Medicina Johns Hopkins, en la que también dirige el Laboratorio de Neuroingeniería Vestibular. Su práctica quirúrgica se concentra en pacientes afectados de trastornos vestibulares y en la recuperación de audición mediante implantes cocleares. Como investigador, desarrolla una prótesis para el tratamiento de individuos que han perdido la sensación vestibular.

Bibliografía complementaria

LIVING WITHOUT A BALANCING MECHANISM. John Crawford en *British Journal of Ophtalmology*, vol. 48, n.º 7, págs. 357-360; julio, 1964.

GENTAMICIN-INDUCED BILATERAL VESTIBULAR HYPOFUNCTION. L. B. Minor en *Journal of the American Medical Association*, vol. 279, n.º 7, págs. 541-544; 18 de febrero, 1998.

A MULTICHANNEL SEMICIRCULAR CANAL NEURAL PROSTHESIS USING ELECTRICAL STIMULATION TO RESTORE 3-D VESTIBULAR SENSATION. Charles C. Della Santina et al. en *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 54, n.º 6, págs. 1016-1030; junio de 2007.

Calentamiento

El ascenso global de las temperaturas no afecta sólo al hielo, que reverdecen en unas partes y pardean en otras. Esas alte

CONCEPTOS BASICOS

- Una serie detallada de fotos aéreas tomadas en los años cuarenta, con vistas a la prospección de petróleo en el norte de Alaska, ha proporcionado pruebas gráficas del mayor protagonismo de los arbustos y del "reverdecimiento" de la tundra ártica.
- Sin embargo, la teledetección por satélite indica que los bosques boreales al sur de la tundra están "pardeando" como consecuencia de las condiciones más secas y la intensificación de los incendios forestales y las infestaciones de insectos.
- Los procesos de reverdecimiento y pardeado pueden atribuirse al cambio climático mundial. Es probable que esas transiciones de los ecosistemas afecten profundamente a la fauna silvestre y a los habitantes de la región, e incluso intensifiquen el calentamiento del planeta.

Corría el año 1944. La segunda guerra mundial tocaba a su fin. Pero la sospecha de que los japoneses continuarían luchando hasta vencer o morir tenía muy preocupados a los aliados, por miedo a quedarse sin gasolina para el esfuerzo bélico. La reserva de petróleo naval, de 93.000 kilómetros cuadrados, era una región privilegiada donde hallar nuevas fuentes de petróleo. La Armada estadounidense acometió su exploración. Pero carecía de mapas. Así que decidió realizar una serie de fotografías aéreas de extraordinario detalle.

Partiendo del aeródromo Ladd, cerca de Fairbanks, los agrimensores montaron en la puerta abierta de un avión bimotor Beechcraft una enorme cámara K-18. Durante varios años, y en vuelos bajos y lentos, tomaron miles de fotografías del talud septentrional de Alaska, desde el océano Artico, en el norte, hasta la cordillera Brooks, en el sur, así como de los valles boscosos de la parte meridional de la cordillera. Estos forman parte del bosque boreal de coníferas y caducifolios que se extiende a lo largo de una amplia franja del Artico (*véase el mapa del recuadro* "Hace sesenta años"). De los negativos de 23 por 46 centímetros se obtuvieron fotografías tan nítidas que podían verse en ellas las huellas de las pezuñas de alces. Algunas imágenes no desmerecerían las del gran fotógrafo Ansel Adams; pero más importante



y vegetación ártica

sino también a la tundra y los bosques boreales,
raciones podrían exacerbar a su vez el cambio climático

Matthew Sturm

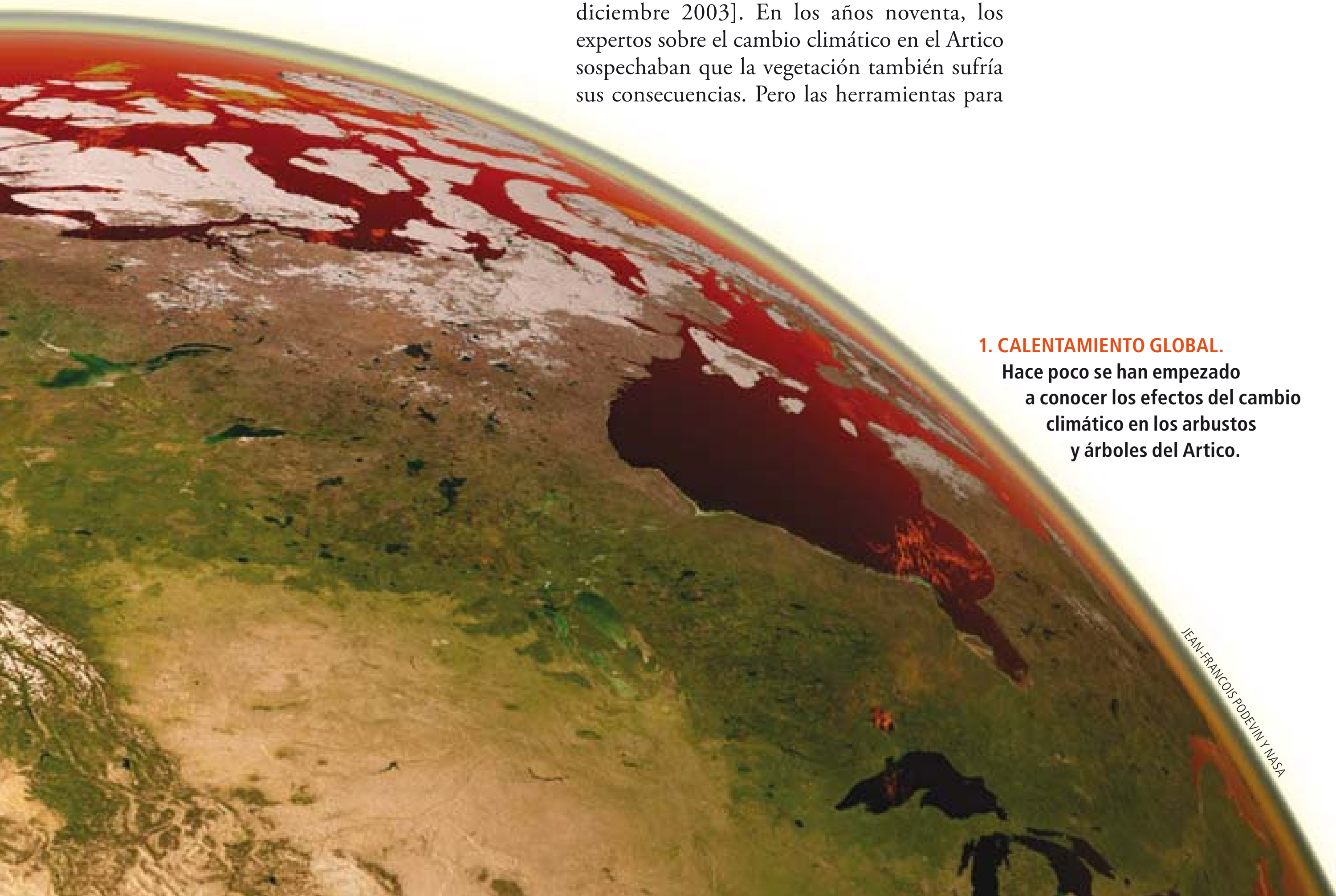
aún, toda la serie ha contribuido de manera esencial a demostrar la respuesta de las tierras árticas y subárticas al cambio climático.

Conocer ese efecto es fundamental, ya que ayudará a los habitantes locales a encontrar soluciones ante nuevas alteraciones. En el Artico viven unos cuatro millones de personas. Los cambios del clima afectan a la caza de subsistencia, las explotaciones forestales comerciales, los transportes y las infraestructuras.

Además, variaciones rápidas en la cubierta del suelo pueden tener consecuencias en otras partes del mundo. Por ejemplo, la fusión del permafrost libera a la atmósfera el carbono (en forma de dióxido de carbono o metano) atrapado en las turberas, lo que a su vez contribuye de modo notable al calentamiento del clima.

Medir el reverdecimiento

Antes de que en la portada de la revista *Time* del año 2006 apareciera un oso polar sobre un minúsculo témpano de hielo, ya se sabía que el hielo marino del Artico se estaba fundiendo con rapidez [*véase* "Fusión en el norte", de Matthew Sturm, Donald K. Perovich y Mark C. Serreze; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre 2003]. En los años noventa, los expertos sobre el cambio climático en el Artico sospechaban que la vegetación también sufría sus consecuencias. Pero las herramientas para

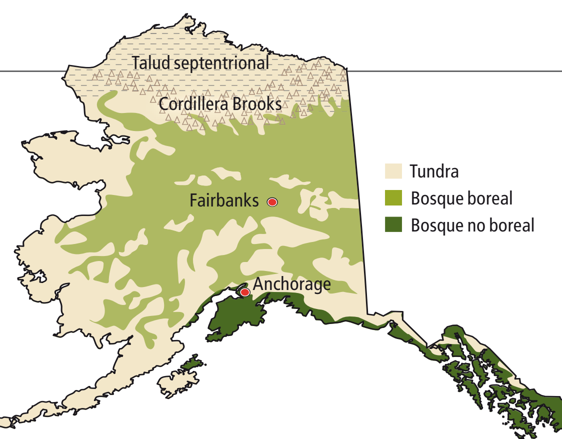


1. CALENTAMIENTO GLOBAL. Hace poco se han empezado a conocer los efectos del cambio climático en los arbustos y árboles del Artico.

JEAN-FRANCOIS PODEVIN Y NASA

Hace sesenta años

Un proyecto de la segunda guerra mundial ha contribuido de modo fortuito a documentar los cambios en la vegetación del Artico desde esa época. Preocupado por los recursos petrolíferos cuando la guerra tocaba a su fin, el gobierno de Estados Unidos decidió prospectar el talud septentrional de Alaska (*área punteada*), en busca de posibles yacimientos de petróleo. Al no existir mapas útiles, los agrimensores de la Armada estadounidense tomaron miles de fotografías de alta calidad desde un avión bimotor Beechcraft (*abajo, izquierda*). Utilizaron una cámara K-18 de gran formato y de un metro de largo (*abajo, derecha*) montada en la puerta abierta del avión. Cuando el autor obtuvo las fotografías decenios más tarde, quedó admirado por la belleza de muchas de ellas (*véase un ejemplo en la figura 2*). Pero se emocionó más todavía por su valor científico. El autor y sus colaboradores se dedicaron a fotografiar de nuevo las mismas localidades. Al comparar las imágenes nuevas con las antiguas pudieron documentar profundos cambios en la vegetación.







JESSICA HUPPI (*mapa*); AP PHOTO (*aeroplano*); CORTESIA DEL MUSEO NACIONAL DE LAS FUERZAS AEREAS DE EE.UU. (*cámara*)

el seguimiento de las alteraciones terrestres no eran tan eficaces como las que se usaban para el estudio del hielo marino. Este, de color blanco, contrasta claramente con el agua oceánica, de color oscuro, lo que facilita la observación de los cambios en el hielo y el agua desde satélites y aviones. Por contra, las variaciones provocadas por el clima en la tundra (región sin árboles donde el subsuelo permanece helado) y el bosque suelen ser sutiles; a veces consisten en una lenta transición en la composición de especies vegetales, en lugar del paso brusco de un tipo de ecosistema a otro. Los cambios en la vegetación se detectan al cabo de años, incluso decenios.

Sin embargo, sabíamos muy bien el tipo de cambios que debíamos investigar. Algunos experimentos de invernadero en la tundra habían demostrado que la fertilización y el calentamiento artificial del suelo producían un crecimiento notable de los arbustos en detrimento de las plantas herbáceas, como juncias y musgos. Las plantas de abedul enano, que antes medían alrededor de medio metro, alcanzaban la altura de una persona en cuestión de años. Basándonos en esos datos, planteamos la hipótesis de que el cambio climático desencadenaría en la tundra un aumento de la biomasa, posiblemente espectacular, debido a una mayor presencia y tamaño de los arbustos. Más al sur, en los bosques boreales, el límite del bosque avanzaba desde hacía años en latitud, hacia el norte, y en altitud, montaña arriba. Cabía esperar, pues, que el ascenso de las temperaturas acelerara esa tendencia.

Pero se trataba de una mera suposición. Por aquella época, varios grupos intentaban observar modificaciones en la vegetación mediante la teledetección o estudios intensivos de campo en pequeñas parcelas. En nuestro centro, junto con Chuck Racine y Ken Tape, pensamos sobre la posibilidad de aprovechar la información de fotografías antiguas... si es que conseguíamos dar con esos documentos. Durante nuestra búsqueda, un archivero mencionó que guardaba en su almacén algunas fotografías aéreas de la Armada, de los años cuarenta. ¿Serían de nuestro interés? Había planeado deshacerse de ellas debido al limitado espacio del almacén. Aguardé impaciente la llegada de las fotografías. Cuando las extendí



2. FOTOGRAFIA DE LOS AÑOS CUARENTA, tomada por

sobre mi mesa, quedé admirado por su interés científico y belleza. Al final, logramos recopilar unas 6000 de esas fotografías en nuestros estantes.

En el verano de 2000 acometimos nuestro estudio centrado en la tundra. La definición de tundra, una vegetación de porte bajo y subsuelo permanentemente helado, no transmite la gran belleza y complejidad de ese ecosistema. La tundra, que cubre el cinco por ciento de la superficie emergida de la Tierra, está formada en gran parte por una espesa capa de musgos, líquenes y juncias (de aspecto herbáceo), con la presencia esporádica de otras plantas vasculares y arbustos enanos. Desde el aire, ese ecosistema guarda semejanza con una alfombra verde, afelpada y regular. Sobre el terreno, en cambio, se aprecia un mosaico de diversas plantas muy esponjosas que dificultan la marcha, aunque cuando están secas ofrecen un lugar cómodo donde descansar. Y la vegetación no es en absoluto regular. Las juncias y otras plantas crecen formando montecillos herbáceos o macollas, obstáculos que desesperan a cualquier caminante. La parte superior de esas protuberancias del terreno, de alrededor de medio metro de altura, es inestable; cuando reciben peso se desploman, con lo que provocan caídas y torceduras de tobillo a los excursionistas. Los arbustos enanos suelen esconderse en los espacios entre las macollas, aunque a veces forman cerca del agua rodales densos de arbustos que se yerguen hasta alcanzar la altura de una persona.

A mayor latitud, más yerma se vuelve la tundra, hasta que desaparece el componente arbustivo. Finalmente, los musgos y líquenes dejan paso a extensas áreas de suelo desnudo, el denominado desierto polar. Hacia el sur, van introduciéndose en la tundra algunos abetos dispersos; luego se forma un mosaico de tundra y bosque, y, por último, el bosque boreal o taiga. La transición de la tundra a la taiga puede ser abrupta, o bien extenderse a lo largo de decenas de kilómetros. En Alaska, la frontera coincide en gran medida con el borde meridional de la cordillera Brooks.

Para obtener las imágenes de los mismos lugares fotografiados en el pasado, volamos en un helicóptero con las puertas abiertas, pertrechados con copias de las fotos antiguas. Dábamos vueltas hasta identificar, con la mayor exactitud posible, el lugar de la imagen original. A menudo volábamos apenas a 15 metros del suelo, lo que no hacía más que aumentar el respeto hacia nuestros predecesores de la segunda guerra mundial en su avión de alas fijas. Con esmero, conseguimos un ajuste bastante bueno. A lo largo de cuatro veranos, obtuvimos imágenes de más de 200 localidades. Al atardecer, comparábamos las nuevas fotografías con las antiguas y realizábamos una evaluación preliminar. Imagen tras imagen, apreciábamos el crecimiento de los arbustos en 50 años (para nuestra sorpresa, ciertos arbustos estaban todavía vivos y podían reconocerse en las fotos de la Armada). Además, el matorral se había adentrado en la tundra, en lugares donde antes los arbustos eran menores y no alcanzaban nuestro límite de detección, de unos 50 centímetros de altura. Sauces, abedules y alisos, los arbustos árticos de mayor porte, habían aumentado su distribución y tamaño. Nos impresionó en particular un patrón de colonización que denominamos "tropas de choque": los arbustos ocupaban antiguas terrazas fluviales y llanos de la tundra, y en muy pocas décadas se habían extendido por hectáreas de territorio en donde antes no había esas plantas.

La realidad de la transformación se nos hizo evidente cuando comprobamos las imágenes sobre el terreno. Los arbustos que en las nuevas fotografías aparecían como pequeños círculos oscuros resultaron ser tan altos como una persona. A menudo se hallaban rodeados por un halo de arbustos de menor porte, a los que el arbusto mayor parecía proteger de los fuertes vientos y las ventiscas. En algunos lugares, los arbustos eran tan espesos que formaban

JERGA ARTICA

Albedo: Medida en que un objeto o superficie refleja la luz del Sol. La nieve y el hielo son reflectores máximos. Devuelven al espacio hasta el 85 por ciento de la luz solar, con lo que limitan el calentamiento de la Tierra.

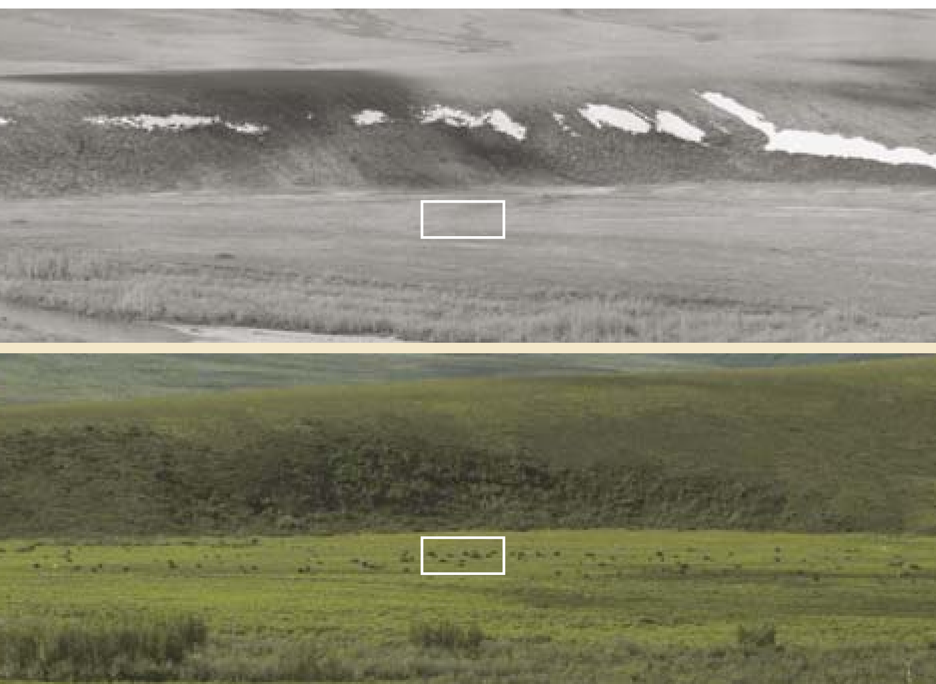
Taiga o bosque boreal: Bosque situado en el círculo ártico y bajo el mismo; está formado principalmente por coníferas y constituye el mayor ecosistema terrestre del mundo.

Tundra: Región del Artico desprovista de árboles donde el subsuelo permanece helado y el suelo está cubierto por vegetación baja y densa.

CORTESIA DE LA ARMADA DE EE.UU.



topógrafos de la Armada estadounidense; se observan barrancos a lo largo del río Colville, donde se ha acumulado la nieve invernal arrastrada por el viento.



3. LA COMPARACION de fotografías tomadas en el talud septentrional de Alaska en los años cuarenta y en la misma estación del año a principios del siglo XXI proporciona una prueba gráfica del crecimiento vegetal. En la imagen en color, de 2002, destacan los arbustos, de la altura de una persona, que colonizan una terraza de tundra (proceso que hemos denominado "tropas de choque").

CORTESIA DE LA ARMADA DE EE.UU. (*fotografía superior*); CORTESIA DE KEN TAPE (*fotografía inferior*)

matorrales impenetrables. Hacia el final del segundo verano, después de habernos abierto paso a duras penas a través de docenas de matorrales inextricables, acuñamos la expresión "Artico arbustivo" para resumir lo que venía sucediendo en el paisaje. En conjunto, las fotografías documentaban la expansión de los arbustos en una región de Alaska septentrional de más de 200.000 kilómetros cuadrados.

Pero, ¿qué ocurría con la tundra fuera de Alaska? ¿Y con los bosques de taiga meridionales? Para responder a esas preguntas, los investigadores Scott Goetz, Doug Stow, Skip Walker, Gensuo Jia y Dave Verbyla utilizaron los radiómetros de los satélites meteorológicos de la Administración Nacional de la Atmósfera y el Océano (NOAA) y determinaron los cambios en esas localidades, así como en Alaska. Mediante el cómputo del índice normalizado diferencial de la vegetación (NDVI), basado en la reflectancia en las bandas del rojo e infrarrojo cercano, descubrieron que la tundra se estaba volviendo más verde. Dado que el color verde se correlaciona con la biomasa y el crecimiento de brotes nuevos, los investigadores interpretaron que el componente arbustivo de la tundra adquiría cada vez mayor protagonismo. El aumento del NDVI era más pronunciado en la Alaska ártica, Canadá occidental y Siberia, pero podía detectarse asimismo en Escandinavia y otras partes del Artico. Otros científicos (Bruce Forbes, en Rusia; Greg Henry, en el alto Artico del Canadá; y Paul Grogan, en el Artico central del Canadá) obtuvieron resultados similares en sus estudios de campo. La idea de la expansión gradual de los matorrales era respaldada, además, por los recuerdos de habitantes de zonas árticas en Alaska, Canadá y Rusia.

Los cambios del clima en el Artico afectan localmente a la caza, la explotación forestal, el transporte y las infraestructuras e intensifican el calentamiento del planeta

Una comparación detallada del registro más reciente del reverdecimiento de la tundra, procedente de imágenes de satélite, con nuestro mapa, basado en las fotografías, proporciona una nueva visión: el NDVI aumenta no sólo en las zonas de tundra donde las fotografías muestran matorrales de mayor tamaño, sino también allí donde sólo suelen crecer matorrales enanos (por debajo del límite de detección de la fotografía). Esos arbustos pequeños entre las macollas son ubicuos y plásticos: alteran su forma de desarrollo al mejorar las condiciones de crecimiento, lo que les permite alcanzar un tamaño considerable. Con los miniarbustos ya situados en un área extensa, las regiones de la tundra están listas para una rápida expansión.

Tal fenómeno no carece de precedentes. El paleorregistro (a partir del polen identificado en testigos de sedimento) demuestra un aumento brusco del polen de los arbustos hace unos 8000 años. Conocido comúnmente como la "explosión del abedul", parece marcar una época en la que los arbustos cubrieron todo el paisaje de la tundra.

Cambios singulares en el bosque

Los registros de los satélites revelaron un resultado aún más sorprendente en los vastos bosques boreales situados al sur y alrededor de la tundra. Ciertos estudios confirmaban que el límite del bosque continuaba desplazándose hacia el norte y a una mayor altitud. Pero en muchos lugares, los satélites indicaban que, detrás de ese frente de avance, la biomasa y la productividad forestal disminuían. Los bosques pardeaban (se secaban y morían) al tiempo que la tundra reverdecía, fenómeno que parece contradecir la idea habitual sobre la respuesta de los bosques al cambio climático.

Las muestras de anillos de árboles de las inmediaciones de Fairbanks y al sur de la cordillera Brooks, recolectadas hace aproximadamente una década por Glenn Juday y Martin Wilmking, entonces en la Universidad de Alaska en Fairbanks, han arrojado luz sobre la aparente contradicción. En vez de la acostumbrada correlación positiva (el ascenso de las temperaturas en verano da lugar a un mayor crecimiento y anillos más anchos), identificaron algunas poblaciones con anillos más estrechos y árboles de crecimiento más lento. En Alaska occidental, con una mayor hume-

dad, los árboles crecían más vigorosamente al aumentar la temperatura; pero a medida que se desplazaban hacia el este, hacia áreas más secas, descubrieron anillos menores, árboles enfermizos y poblaciones que sobrevivían a duras penas o incluso perecían. No soportaban las condiciones tan secas de los veranos más cálidos.

Otros dos dendrocronólogos, Andi Lloyd, del Middlebury College, y Andy Bunn, de la Universidad de Washington Occidental, a partir de todos los registros de anillos de árboles boreales que lograron reunir, confirmaron que el pardeado de los bosques boreales representaba un fenómeno panártico y que, aunque predominaba en los abetos, afectaba a todas las especies arbóreas boreales. Todavía se está intentando dilucidar las causas exactas de la reducción del crecimiento arbóreo. Se apunta a la sequía y al estrés térmico como motivos principales, porque el pardeado se ha observado con mayor frecuencia en las localidades continentales secas y en la parte meridional del área de distribución de las distintas especies.

Otros dos factores, posiblemente relacionados con el cambio climático, han perturbado los bosques: el aumento de las plagas de insectos y de la frecuencia de los incendios. En Alaska, las épocas de grandes incendios forestales parecen repetirse cada cinco años, en lugar de cada diez; y las infestaciones de insectos, como el escarabajo de la corteza de los abetos (*Dendroctonus rufipennis*), que hasta ahora ha arrasado más de 500.000 hectáreas de bosque de alta calidad en Alaska, parecen intensificarse.

Un futuro incierto

Los cambios experimentados por la tundra y los bosques boreales de Alaska exhiben una simetría irónica. En los últimos 50 años, los bosques han colonizado 11.600 kilómetros cuadrados del borde meridional de la tundra; pero, al mismo tiempo, detrás de su frente de avance, han venido sufriendo los efectos de la sequía, los incendios y las plagas de insectos. Juday y otros sugieren que, en última instancia, el bosque se convertirá en pradera. Pero a la vez, la tundra se está volviendo cada vez más arbustiva y espesa. ¿Acaso el futuro nos deparará una sustitución del bosque por tundra, y de la tundra por bosque?

La dificultad de esa pregunta estriba en nuestro escaso conocimiento de los procesos que impulsan los cambios en la vegetación, por no hablar de su evolución futura. El hielo marino del Artico es un sistema simple constituido por agua y hielo, que en principio responde a leyes físicas que pueden describirse mediante modelos. Sin embargo, el hielo se ha ido reduciendo al doble de la velocidad calculada por 13 de los mejores modelos a gran escala. Se prevé que dentro de 40 años habrá desparecido el hielo del océano Artico, aunque esa predicción se ha basado más en una extrapolación a partir de los cambios observados que en los resultados de los modelos. Por lo que respecta a la tundra y los bosques

En mi fuero interno creo que el paisaje de la tundra cambiará más deprisa de lo que predice nuestro burdo modelo

CORTESIA DE GASIUS R. SHAVER *Laboratorio de Biología Marina (invernadero)*; CORTESIA DE KEN TAPE *(efecto halo)*





4. LOS EXPERIMENTOS y las observaciones respaldan las pruebas fotográficas de que la tundra se está tornando más arbustiva. En estudios de invernadero en los que se calentaba artificialmente el suelo (*arriba*; se ha retirado la cubierta del invernadero), la altura de los arbustos alcanzó la de una persona, mientras que la de los arbustos en suelo normal se mantuvo al nivel de la rodilla. Observaciones en la naturaleza (*derecha*) indican que los arbustos mayores, gracias al efecto halo, protegen a los de menor porte de los elementos; se promueve así el crecimiento en anillos concéntricos (*líneas amarillas*) alrededor de las plantas de mayor tamaño, lo que da lugar a una tundra mucho más verde.

El autor

Desde 1987, tras terminar su doctorado en la Universidad de Alaska en Fairbanks, **Matthew Sturm** es investigador del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos.

boreales, con su gran complejidad biológica y mecanismos contrapuestos (algunos que frenan el crecimiento y otros que lo aceleran), los modelos actuales son todavía demasiado simples para arrojar predicciones precisas.

En un artículo reciente, mi grupo intentó abordar la evolución de los arbustos de la tundra mediante un modelo sencillo de crecimiento de las poblaciones de arbustos y la comparación de fotografías. Esperábamos que la expansión de los arbustos calculada por el modelo se correspondería con el calentamiento del Artico desde los años setenta. Para nuestra sorpresa, el modelo indicaba que la expansión se había iniciado hacía unos 150 años, hacia el final de la Pequeña Edad del Hielo. El hecho coincidía con la aparición de los alces, esos ramoneadores patilargos de arbustos, en el talud septentrional de Alaska, así como con el avance del límite del bosque.

Los resultados del modelo apuntaban a una extensión gradual de los arbustos en respuesta a un ciclo de calentamiento natural que empezó mucho antes de la revolución industrial. Otros datos indican que, aunque el proceso se iniciara antes de forma natural, en la actualidad continúa y tiende a acelerarse a causa del calentamiento provocado por el hombre. Además, la región de propagación de los arbustos ha sufrido las cuatro últimas décadas un retroceso notable de los glaciares, un derretimiento acelerado del permafrost y un avance en el inicio de la primavera (tal como indican las fechas de congelación y fusión de las aguas de ríos y lagos); todos estos fenómenos se han relacionado con el cambio climático de origen antrópico. Desgraciadamente, es improbable que existan fotografías de inicios del siglo xx que nos permitan demostrar una expansión de los arbustos más lenta entre 1900 y 1950 que entre 1950 y la actualidad.

El mismo modelo simple predecía que harán falta al menos 150 años para que las áreas donde abundan hoy los arbustos se cubran completamente de matorrales; allí donde no hay arbustos, se tardará todavía más. Sin embargo, el modelo no tiene en cuenta posibles acontecimientos catastróficos como los incendios, que pueden alterar en poco tiempo la vegetación (los arbustos tienden a prosperar en las áreas perturbadas), ni incluye efectos de retroalimentación que pueden acelerar el cambio. En mi fuero interno creo que nuestra predicción es demasiado conservadora. El paisaje de la tundra cambiará más deprisa de lo que prevé nuestro burdo modelo.

Esa sospecha nace de la observación de las consecuencias de los incendios actuales. Por ejemplo, el mayor incendio de la tundra causado por un rayo, que duró desde julio hasta septiembre de 2007, con unas condiciones meteorológicas excepcionalmente secas, arrasó más de 100.000 hectáreas en el talud septentrional de Alaska. Chuck Racine visitó la zona en julio de 2009 y verificó el rebrote de los arbustos en muchos lugares. En áreas semejantes de Alaska occidental, calcinadas hacía más tiempo, el recubrimiento arbustivo se había multiplicado por ocho en 30 años. La intensificación de las tormentas eléctricas y de las condiciones secas podría provocar más incendios. Además, los arbustos, con su mayor biomasa y ramificación, aumentan la probabilidad de incendios en el futuro, creándose así un efecto de retroalimentación positivo.

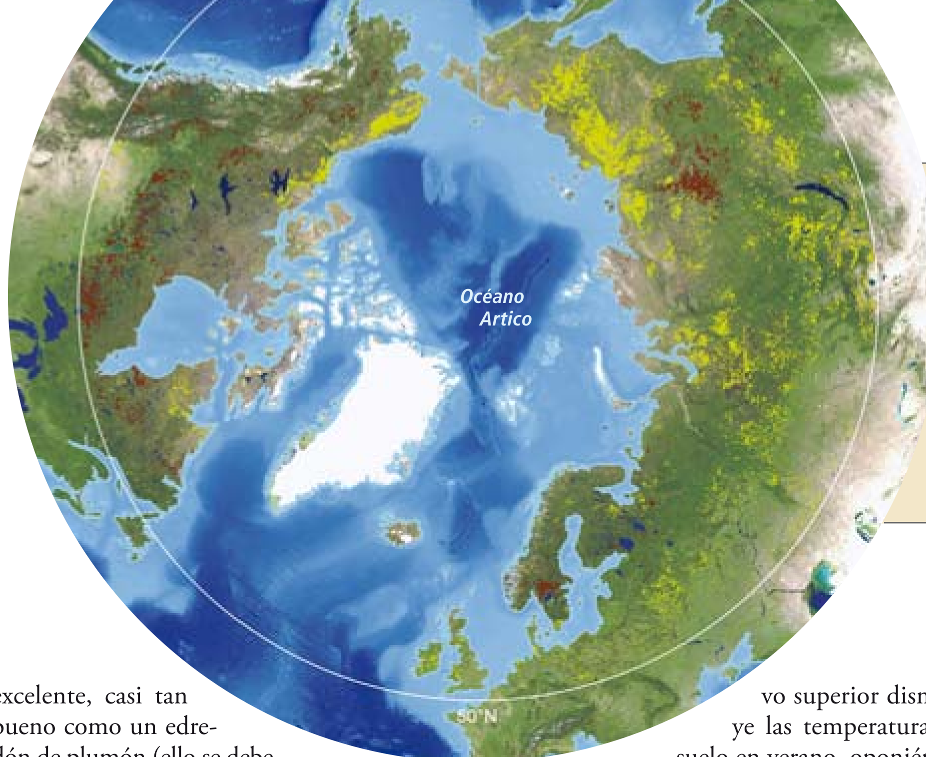
De entre los otros mecanismos de retroalimentación que operan en la tundra, conocemos al menos dos de efecto positivo relacionados con la cubierta de nieve en invierno. Se tiende a pensar en una escasa influencia del invierno sobre el desarrollo de los arbustos, ya que éstos crecen durante el verano. Pero los procesos invernales determinan las condiciones edáficas e hídricas de la siguiente estación de crecimiento. La importancia del invierno para las plantas del Artico reside en su larga duración. La tundra está cubierta de nieve durante nueve meses al año, y la taiga siete, lo que hace del blanco, y no el verde, el color predominante de esas regiones.

Uno de los procesos de retroalimentación funciona así: los arbustos que consiguen crecer por encima de las macollas herbáceas, durante el invierno atrapan la nieve y forman ventisqueros, de modo que aumentan el espesor de la nieve a su alrededor. La nieve es un aislante

5. LAS EPOCAS DE GRANDES INCENDIOS FORESTALES en Alaska parecen sucederse ahora con mayor frecuencia, y los incendios son más intensos. Los incendios y los daños producidos por los insectos se alían para pardear el bosque boreal, antaño verde. En estas zonas quemadas proliferan los arbustos, que, con su mayor biomasa y ramificación, aumentan la probabilidad de nuevos incendios en el futuro.



ALASKA STOCK



6. EL MAPA DEL ARTICO, basado en datos de satélites recopilados y analizados por el grupo de Scott Goetz, del Centro de Investigación de Woods Hole, refleja cambios en el estado de la tundra y del bosque boreal entre 1982 y 2005. Los análisis, concordantes con otros estudios, demuestran que el crecimiento de los arbustos había aumentado (*áreas verde claro*) y que el bosque había sufrido sequías y una disminución de árboles (*áreas pardas*).

CORTESIA DE SCOTT GOETZ *Centro de investigación Woods Hole*

excelente, casi tan bueno como un edredón de plumón (ello se debe a que la nieve acumulada contiene hasta un 75 por ciento de aire). Allí donde la capa de nieve es más gruesa, las temperaturas del suelo no descienden tanto. En algunas zonas de arbustos hemos registrado temperaturas en la base de la nieve 10 grados Celsius superiores a las zonas adyacentes con macollas. Las condiciones más cálidas prolongan en invierno la actividad microbiana del suelo, que concentra así más nutrientes. En consecuencia, al llegar el verano, los arbustos crecen vigorosamente y alcanzan mayor altura, lo que les permite atrapar más nieve en los inviernos siguientes. De este modo, el ciclo se refuerza.

El otro efecto de retroalimentación deriva del albedo (reflectividad) de la nieve. Las ramas oscuras de los matorrales altos sobresalen de la nieve durante el invierno, y sobre todo en la primavera. Las ramas absorben más energía solar que la nieve blanca, lo bastante para causar un calentamiento local y acelerar en primavera la fusión. Como resultado, se adelanta la estación de crecimiento y los arbustos alcanzan aún mayor altura.

Los mecanismos de retroalimentación invernales son fáciles de comprender, si se consideran por separado. Pero puesto que no son mutuamente independientes, ni tampoco lo son respecto a los procesos estivales (algunos de ellos se conocen, pero otros no), el efecto neto es incierto. Por ejemplo, los ventisqueros más profundos producidos por los matorrales deberían, en principio, tardar más en derretirse en primavera que la nieve de otras zonas próximas. ¿Puede entonces el efecto del albedo contrarrestar la mayor lentitud de fusión de la nieve más espesa? La sombra y la hojarasca, dos procesos de retroalimentación estivales, no acaban de entenderse del todo. Se sabe que la sombra asociada a un recubrimiento arbustivo superior disminuye las temperaturas del suelo en verano, oponiéndose al efecto ventajoso de los ventisqueros invernales sobre la actividad microbiana. Por otro lado, la hojarasca de los arbustos modifica la concentración de nutrientes alrededor de éstos y puede estimular su crecimiento.

Muchos investigadores intentan describir esos efectos contradictorios, o al menos confusos; de hecho, varios grupos desarrollan modelos predictivos de la evolución de la tundra y del bosque boreal. Pero una de las incógnitas clave es saber si el clima futuro traerá más o menos nieve. Siguiendo el ejemplo del estudio de la desaparición del hielo marino, para hallar la respuesta a las grandes preguntas deberemos investigar los cambios físicos actuales en el paisaje y proyectarlos en el futuro, y no únicamente aplicar modelos informáticos. No es de extrañar, pues, que los pares de fotografías de Alaska se utilicen como datos experimentales en el desarrollo de modelos.

Tuvimos la enorme fortuna de poder disponer de las fotografías excepcionales realizadas por la Armada en el talud septentrional de Alaska. El hallazgo fortuito es tan importante en ciencia como en otros aspectos de la vida. Sin las fotografías quizá no hubiéramos identificado tan pronto la transformación del paisaje, posiblemente tan profunda como la fusión del hielo marino. Las fotografías constituyen la prueba más gráfica y evidente del fenómeno, aunque los satélites y la tarea minuciosa de los dendrocronólogos aportan otra información muy valiosa.

Ahora el reto es diseñar un método para predecir la evolución de las tierras árticas y la velocidad con que se producirá. Aunque la complejidad de los sistemas biológicos dificulta la tarea, si anticipamos los cambios antes de que nos sorprendan podremos actuar de forma oportuna.

Bibliografía complementaria

RECENT CLIMATE WARMING FORCES CONTRASTING GROWTH RESPONSES OF WHITE SPRUCE AND TREELINE IN ALASKA THROUGH TEMPERATURE THRESHOLDS. M. Wilmking *et al.* en *Global Change Biology*, vol. 10, n.º 10, págs. 1724-1736; octubre 2004.

THE EVIDENCE FOR SHRUB EXPANSION IN NORTHERN ALASKA AND THE PAN-ARCTIC. K. Tape, M. Sturm y C. Racine en *Global Change Biology*, vol. 12, n.º 4, págs. 686-702; abril 2006.

RESPONSES OF THE CIRCUMPOLAR BOREAL FOREST TO 20TH CENTURY CLIMATE VARIABILITY. A. H. Lloyd y A. G. Bunn en *Environmental Research Letters*, vol. 2, n.º 4, págs. 1-13; 26 noviembre 2007.

THE GREENING AND BROWNING OF ALASKA BASED ON 1982-2003 SATELLITE DATA. D. Verbyla en *Global Ecology and Biogeography*, vol. 17, n.º 4, págs. 547-555; julio 2008.

RUSSIAN ARCTIC WARMING AND “GREENING” ARE CLOSELY TRACKED BY TUNDRA SHRUB WILLOWS. Bruce C. Forbes, Marc Macias Fauria y Pentti Zetterberg en *Global Climate Change Biology*. Publicado en línea, 7 agosto 2009.

Patología digital

Las muestras patológicas digitalizadas ayudarían a obtener diagnósticos más rápidos y certeros

MIKE MAY

A finales de los años noventa del siglo pasado, Dirk G. Soenksen se cuestionaba la manera de proceder en patología. Al mismo tiempo que los patólogos se afanaban para conseguir imágenes de buena calidad con el microscopio, sus hijos jugaban con la videoconsola ante pantallas de alta resolución. ¿No podrían contemplarse del mismo modo las muestras de tejidos humanos?

Este interrogante le llevaría a recorrer un largo camino. Tras dieciocho meses de arduo trabajo, Soenksen se erigía como director de Aperio, una compañía de patología digital afincada hoy en Vista, California. Sus objetivos —así como los de otras empresas jóvenes y grandes firmas sanitarias— no se limitan a trasladar de los microscopios a los ordenadores las imágenes de tejidos afectados, sino que se enmarcan en un contexto más general: convertir la anatomía patológica (y, con ella, la interpretación de biopsias) en una ciencia mucho más cuantitativa. Ello mejoraría la precisión de los diagnósticos y ofrecería a los médicos un seguimiento más fino de los tratamientos, lo que ayudaría a evaluar su eficacia y a introducir con rapidez cualquier modificación necesaria.

Es cierto que la mayoría de los patólogos ya emplean de un modo u otro los medios informáticos, aunque sólo sea para hacer anotaciones en las bases de datos de pacientes. Pero sólo aquellos que se dedican a la investigación recurren con cierta asiduidad a muestras digitalizadas. En general, los patólogos carecen de medios para obtenerlas o para acceder a las mismas. La Agencia Federal de Fármacos y Alimentos estadounidense (FDA) sólo autoriza el examen de muestras digitales para ciertas aplicaciones clínicas, todas ellas relacionadas con el cáncer de mama.

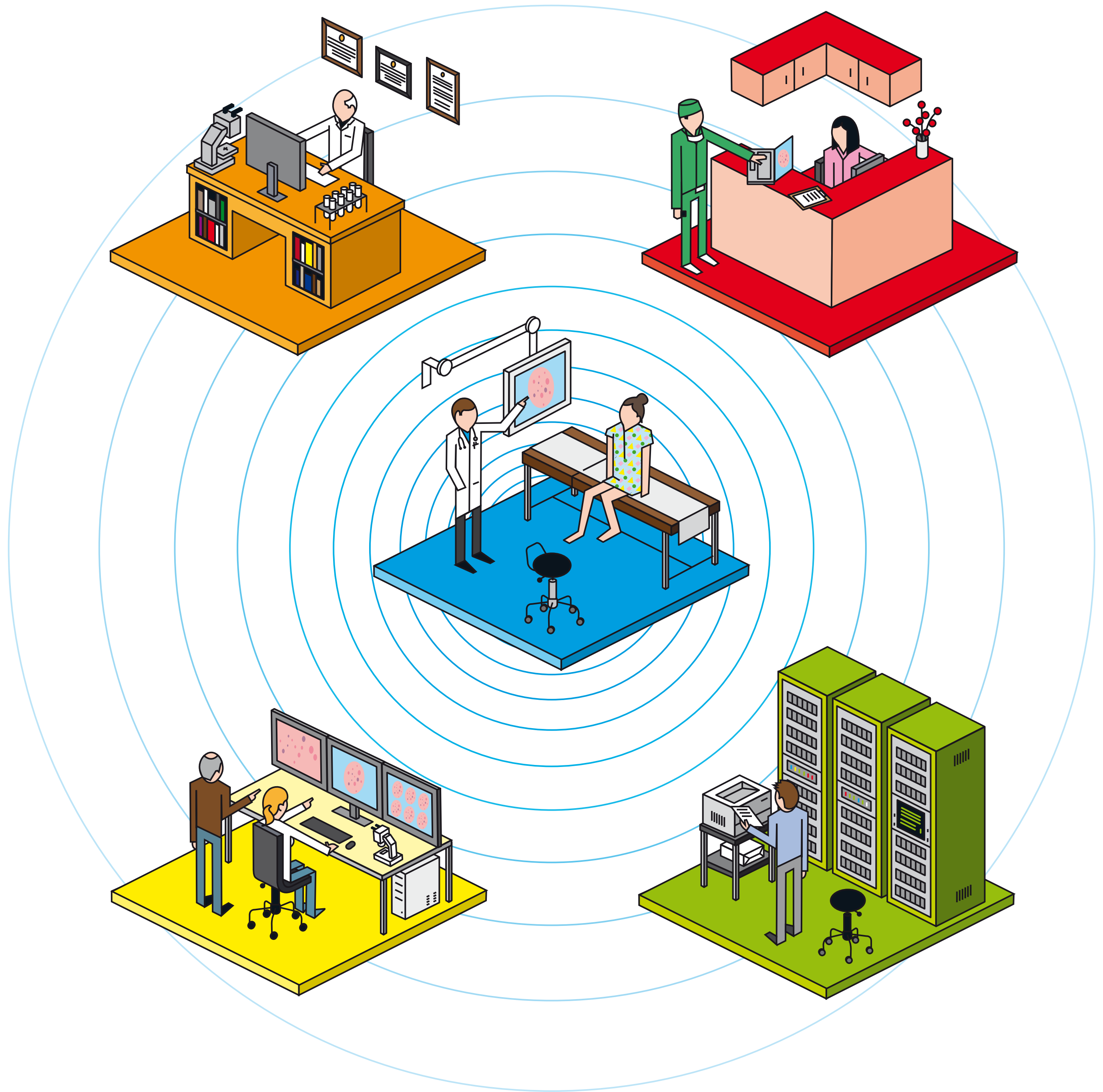
Hoy por hoy, los cientos de millones de muestras que se preparan cada año siguen manipulándose tal y como se hacía un siglo atrás: una muestra de tejido se secciona en finas láminas que posteriormente se tiñen para destacar rasgos concretos; después, el patólogo coloca la muestra en el portaobjetos de un microscopio. En el caso de la biopsia de un cáncer de mama, por ejemplo, se buscan en el tejido una serie de características, tales como el número de células anómalas y el grado del tumor, que a su vez depende de particularidades como la estructura celular. Como señala George K. Michalopoulos, director del departamento de patología en la Universidad de Pittsburgh, tal tarea de examen punto por punto sobre el microscopio la acomete, hoy en día, el ojo humano.

Es obvio que un patólogo no puede examinar todos y cada uno de los puntos de cada muestra de la que dispone. En cambio, un ordenador sí puede analizar todos los píxeles de una versión digitalizada, amén de identificar y cuantificar los patrones que permiten distinguir entre salud y enfermedad, como son la estructura interna, el color, la textura y la intensidad de cada píxel, célula por célula.

El recurso a medios informáticos no supondría prescindir de los patólogos. Más bien al contrario: una digitalización de las muestras

CONCEPTOS BASICOS

- Sería deseable una renovación de las técnicas en patología clínica. Los métodos de análisis de muestras son los mismos que hace cien años.
- Técnicas recientes permiten novedosas manipulaciones de las imágenes digitalizadas de biopsias.
- En último término, la patología digital proporcionará un diagnóstico más preciso de las muestras de tejidos.



QUICKHONEY

1. LA FACILIDAD DEL DIAGNOSTICO basado en muestras digitalizadas transformará la patología, una de las pocas profesiones analíticas rezagadas en el uso de métodos informáticos.

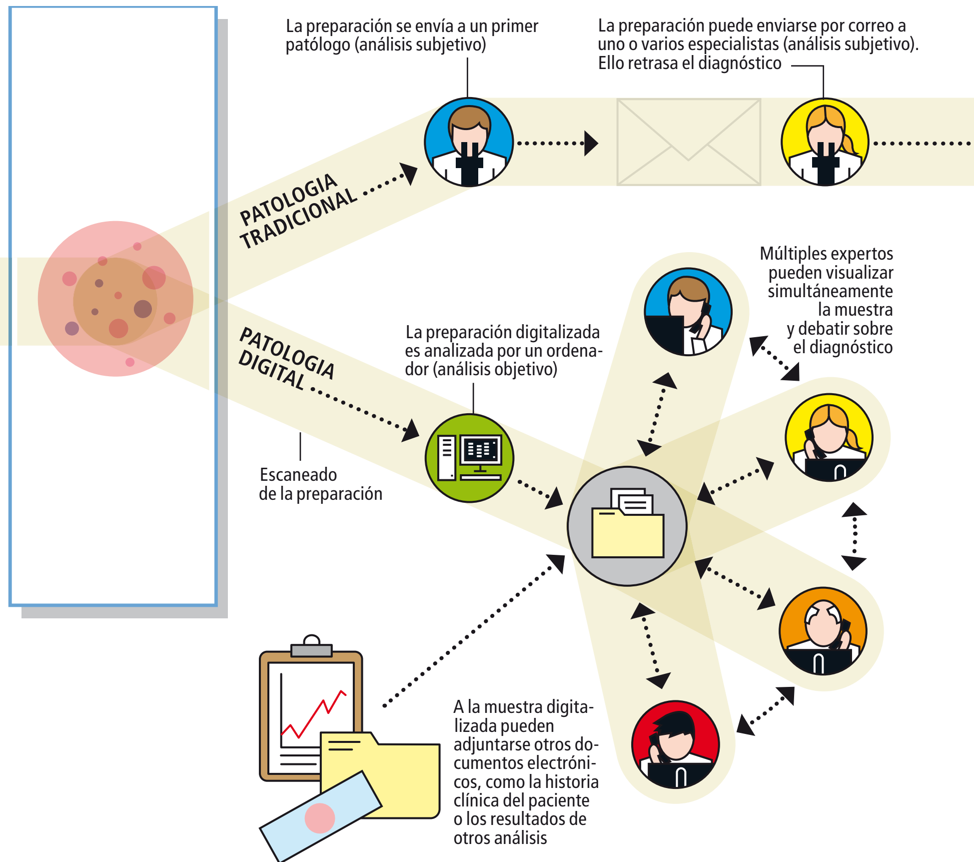
congregaría a más especialistas hacia el proceso de diagnosis y disminuiría el número de errores clínicos. Michalopoulos explica que la consulta entre especialistas forma parte del quehacer cotidiano del patólogo. Pero, a día de hoy, una muestra enviada por correo tarda, en el mejor de los casos, dos o tres días en llegar a destino. En cambio, una imagen tisular digitalizada se enviaría por medios electrónicos o se colocaría en una página web de acceso restringido, de modo que un patólogo en cualquier lugar del mundo podría consultarla en cuestión de segundos. Si las consultas lograsen efectuarse con tal facilidad y rapidez, los especialistas podrían conferenciar con mayor asiduidad. Los desacuerdos entre expertos son habituales, y el único medio de resolverlos es mediante una puesta en común de opiniones.

La combinación de estos dos avances (un análisis más cuantitativo y un acceso más rápido a imágenes compartidas) constituye el principal argumento a favor de la digitalización de las muestras patológicas. Para alcanzar esa meta, sin embargo, han de superarse una serie de retos técnicos e institucionales que Aperio y otras compañías del ramo han comenzado a afrontar.

Obtención y resolución de imágenes

Uno de los obstáculos principales estriba precisamente en obtener una imagen digital de alta resolución a partir de un tejido preparado

2. LOS PATOLOGOS de hoy en día continúan manipulando las muestras de tejidos del mismo modo que se hacía antaño. Las preparaciones para el microscopio se examinan mediante un laborioso proceso en el que múltiples especialistas emiten su opinión. Los métodos digitales permiten compartir inmediatamente la imagen de una muestra, lo que acelera el diagnóstico.



sobre un portaobjetos, tarea mucho más difícil de lo que pudiera pensarse. A principios de los años noventa, algunos patólogos comenzaron a experimentar con la toma digital de imágenes. Para ello, simplemente apuntaban con una cámara digital al ocular del microscopio. Aparte de lo rústico del método, el mismo no proporcionaba una resolución satisfactoria.

Hoy se emplean métodos más elaborados. La muestra, preparada como de costumbre, se introduce en un escáner. Allí, el objetivo de un microscopio (en esencia, una lente de aumento) efectúa un barrido sobre la preparación al tiempo que la imagen se capta mediante técnicas digitales como CCD (dispositivo de cargas acopladas). Una velocidad elevada constituye la base de todos los métodos en patología digital. Para obtener la resolución necesaria, unos 0,5 micrómetros por píxel, el escáner de Aperio tarda unos dos minutos en digitalizar una muestra típica (de unos 15 milímetros de lado, el tamaño de un sello de correos).

Tales cifras ponen de manifiesto un obstáculo fundamental. La digitalización de una muestra como la anterior requiere 900 millones de píxeles. En cambio, una fotografía de 4 × 5 pulgadas (unos 10 × 12 centímetros) escaneada a 300 puntos por pulgada, la resolución normal en la impresión de una revista, contiene sólo 1,8 millones de píxeles; es decir, 500 veces menos. Digitalizar las imágenes más deprisa exige, tanto para recoger los datos como para procesarlos, una electrónica de mayor velocidad. Otros escáneres captan sobre el portaobjetos una imagen descompuesta en pequeños cuadrados, denominados "teselas". Posteriormente, un programa informático los ensambla y compone una muestra digital completa. Otros sistemas, como el de Aperio, exploran la muestra franja a franja (de modo similar la manera de operar de un fax) y construyen la imagen sobre la marcha.

En cualquier caso, la velocidad del escáner siempre parece quedarse corta. Jonhan Ho, dermatólogo del hospital de la Universidad de Pittsburgh, afirma que su laboratorio prepara unos 1,5 millones de muestras al año. Con un escáner que invirtiera dos minutos por muestra, se necesitarían más de cinco años de operación continua para escanear todo ese material.

La calidad de la exploración digital

La siguiente pregunta es si el examen en pantalla de una muestra digitalizada permite, en comparación con la observación en microcopio, una mejor identificación de las anomalías tisulares. Hace unos años, Drazen M. Jukic y varios colaboradores del hospital de la Universidad de Pittsburgh llevaron a cabo un estudio comparativo de las técnicas de patología ordinarias y las digitales. Sus resultados fueron publicados en 2006 en la revista *Human Pathology*. En casi todos los aspectos, los investigadores estimaban que la calidad de los archivos digitales permitía un diagnóstico comparable al de las preparaciones en microscopio.

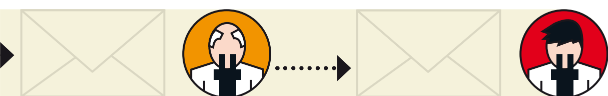
Pero si la calidad de la patología digital se limita a la que puede obtenerse con métodos tradicionales, ¿qué ventajas reporta? Un beneficio obvio lo supone la mencionada facilidad para compartir imágenes. Como ejemplo podemos citar el servidor de imágenes en red de la firma Olympus (Net Image Server), que, junto con el soporte lógico de visualización OlyVIA, opera de manera similar a una página

Bibliografía complementaria

DIGITAL PATHOLOGY IMAGE ANALYSIS: OPPORTUNITIES AND CHALLENGES. Anant Madabhushi en *Imaging in Medicine*, vol. 1, n.º 1, págs. 7-10; octubre de 2009.

DIGITIZING PATHOLOGY. Jeffrey M. Perkel en *Bioscience Technology*, vol. 34, n.º 2, págs. 8-12; 23 de febrero de 2010.

QUICKHONEY (*iconos*); JEN CHRISTIANSEN (*infografía*)



web ordinaria. En vez de enviar preparaciones digitalizadas (con tamaños del orden de gigaoctetos, el contenido de tres discos compactos), el programa permite la creación de almacenes de muestras digitales en una página web o un servidor.

Al pulsar sobre una imagen en miniatura, el programa descarga una imagen de tamaño suficiente como para llenar varias pantallas. Si se quiere, se asemeja a la búsqueda de una dirección en Google Earth: lo que el usuario vuelca en la pantalla no es sino una fracción de una imagen por satélite; para ver más, basta con pulsar en ella y arrastrarla con el ratón. Un patólogo puede enviar los fragmentos de un archivo voluminoso y otros lograrán ver un mapa completo del tejido a través de su conexión a Internet.

Análisis informáticos

Aunque la participación por vía electrónica agilice las consultas entre patólogos, por sí sola no reporta un avance básico para la investigación médica. Sin embargo, el análisis informatizado de las imágenes quizá sí traiga consigo transformaciones de calado. A tal efecto, Aperio y otras compañías ya han desarrollado programas informáticos para el análisis patológico y continúan trabajando para obtener versiones más avanzadas de los mismos.

En algunos casos, como el del cáncer de mama, ya es posible acceder a una valoración informatizada de las imágenes digitales. En cerca de la cuarta parte de los casos, este cáncer genera niveles muy elevados de la proteína HER2 (“receptor-2 del factor de crecimiento epidérmico humano”). La misma se detecta en una muestra de tejido gracias al empleo de tintes específicos.

En un análisis ordinario, se examinan dichas preparaciones tintadas y se evalúan la intensidad del tinte y el número de células coloreadas. Las estimaciones visuales, no obstante, pueden diferir bastante entre un patólogo y otro. Sin embargo, una aplicación informática que mida la intensidad de cada píxel permite cuantificarla con precisión. Ello confiere a los análisis una mayor uniformidad y garantía.

Hasta la fecha, las técnicas informáticas de Aperio y de BioImagene (en Sunnyvale, California) son las únicas autorizadas por la FDA para interpretar los niveles de HER2 en preparaciones digitales. En cualquier caso, las firmas de patología digital esperan lograr pronto mayores avances técnicos y un incremento en el número de licencias. Gene Cartwright, directivo de Omnyx (una empresa de patología digital afincada en Pittsburgh) sostiene que, en un futuro no muy lejano, un ordenador podrá mostrarnos detalles que escapan a nuestros ojos. Tal podría ser el caso en el que se deseara cuantificar la intensidad de varios tintes en una misma preparación. El ojo no lograría distinguirlos, pero un ordenador permitiría analizarlos con facilidad.

Dificultades futuras

Si bien ya existen varias compañías que ofrecen sistemas de patología digital, son los propios patólogos los que deben decidirse a usarlos. Con este objetivo, los técnicos tratan de diseñar una especie de “cabina de mando” para patólogos: un sistema que permita la visualización simultánea de, por ejemplo, una muestra digital extraída durante una intervención quirúrgica, la historia clínica del paciente e informes relativos a otros análisis.

Soenksen afirma que el proceso podría tardar años, ya que sería necesario integrar la información de las muestras digitales junto con el sistema de información del laboratorio de un hospital, el de radiología y otros. Todos estos sistemas deben facilitar una puesta en común de datos, pero, ahora mismo, su implantación evoluciona por separado y con independencia del resto.

A pesar de las dificultades, la patología digital ya está llegando al mundo clínico. No obstante, lo hace por compartimentos estancos, como es el caso de la inspección de marcadores en el cáncer de mama. Según Cartwright, al principio los hospitales quizá limiten los métodos digitales a cierto porcentaje de sus muestras, proporción que aumentaría paulatinamente a lo largo de los años. En cualquier caso, nadie abandonará completamente y de una sola vez los métodos tradicionales.

También es de esperar cierto recelo. “Un patólogo se siente a sus anchas con un microscopio”, afirma Ho. “Para nosotros se trata de un instrumento como el bisturí o el estetoscopio, una prolongación de nuestros dedos... y hay reticencias a la hora de abandonarlo.”

En cualquier caso, la integración de la patología digital en la patología clínica seguirá progresando y, con el tiempo, se extenderá al ámbito forense. Los patólogos interactuarán en mayor medida, cuantificarán con más detalle y pondrán a punto medios cada vez más objetivos para diagnosticar las enfermedades y para estimar la calidad de un tratamiento.

Fotografía de 4 × 5 pulgadas

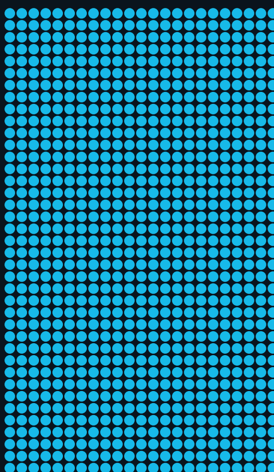
Preparación de 15 × 15 milímetros

LA CAUSA DEL RETRASO

La digitalización invade todos los ámbitos. ¿Cómo se explica entonces que la patología siga sin recurrir a las preparaciones digitales? La respuesta reside en el tamaño de los archivos de almacén de muestras. Digitalizar la imagen de una muestra de tejido del tamaño de un sello de correos requiere 900 millones de píxeles, unas 500 veces más que los que hacen falta para escanear una fotografía de 4 × 5 pulgadas (10 × 12 centímetros) con una resolución de 300 puntos por pulgada.

Original: fotografía de 4 × 5 pulgadas
Resolución: 300 puntos por pulgada (impresión normal)
Total de píxeles: 1,8 millones

Original: preparación de 15 × 15 milímetros
Resolución: 0,5 micrometros por píxel
Total de píxeles: 900 millones





Yuca mejorada

La tercera fuente de calorías mundial tiene el potencial de convertirse en un cultivo más productivo y nutritivo. Aliviaría la desnutrición en varios países en vías de desarrollo

Nagib Nassar y Rodomiro Ortiz

CONCEPTOS BASICOS

- Las raíces de la yuca constituyen la principal fuente de calorías de millones de habitantes de las zonas tropicales; pero se trata de un alimento pobre en proteínas, vitaminas y otros nutrientes.
- Los científicos han obtenido variedades mejoradas de yuca que poseen un mayor valor nutritivo, un rendimiento superior y resistencia a plagas y enfermedades.
- La combinación de técnicas clásicas de mejora vegetal, genómicas y de biología molecular permitiría nuevos avances en el cultivo de la yuca.

La dieta de más de 800 millones de personas no depende del trigo, el maíz o el arroz. En numerosos países, las raíces ricas en almidón de una planta, la mandioca, tapioca o yuca, constituyen el alimento básico de la población. De hecho, la yuca aporta a la humanidad la mayor parte de las calorías, después del arroz y el trigo; representa, por tanto, un arma prácticamente irremplazable contra el hambre. En los trópicos, muchas familias la cultivan en pequeñas parcelas para su consumo propio; en Asia y en algunas partes de Latinoamérica, la yuca se cultiva también con fines comerciales y se destina a la alimentación animal o a productos amiláceos. Sin embargo, la raíz posee un escaso valor nutritivo: contiene pocas proteínas, vitaminas u otras sustancias como el hierro. Por consiguiente, la mejora de las variedades de yuca aliviaría la desnutrición de muchos países en vías de desarrollo.

Alentados por esa idea, uno de los autores (Nassar) junto con colaboradores de la Universidad de Brasilia y otros centros se dedican a desarrollar variedades más resistentes, productivas y nutritivas que puedan utilizar fácilmente los agricultores de los países en vías de desarrollo. Nuestro equipo se centra sobre todo en técnicas clásicas de fitomejoramiento para obtener híbridos entre la yuca y sus parientes silvestres, aprovechando las características adquiridas por estas últimas a lo largo de miles de años de evolución. Este enfoque resulta menos costoso que la manipulación genética y no plantea problemas de seguridad, razones que hacen desconfiar de



contra el hambre

los cultivos transgénicos. Mientras tanto, los investigadores y organizaciones sin ánimo de lucro del mundo desarrollado han comenzado a mostrar interés por la yuca y a producir variedades transgénicas de la planta con los mismos objetivos. La finalización reciente del primer borrador del genoma de la yuca abre nuevas vías a la mejora de la planta.

Favorita en los trópicos

La planta arbórea *Manihot esculenta* (nombre científico de la yuca), y sus parientes silvestres del género *Manihot* son originarios del Brasil. Los pobladores indígenas domesticaron la planta; en el siglo XVI los marineros portugueses la llevaron a Africa; desde allí se expandió al Asia tropical y llegó hasta Indonesia. Africa contribuye hoy a más de la mitad (51 %) de la producción mundial, que supera los 200 millones de toneladas métricas al año; en Asia y Latinoamérica la cosecha asciende al 34 % y 15 %, respectivamente.

Las raíces, que guardan semejanza con las alargadas de la batata (boniato o camote), pueden ingerirse crudas o cocidas, o bien procesarse en gránulos, pastas o harinas. En Africa y otras partes de Asia, la gente consume también las hojas, con lo que aprovecha sus proteínas (una hoja seca de yuca contiene hasta un 32 % de proteínas) y las vitaminas A y B.

El cultivo de la yuca exige una escasa inversión de capital y mano de obra. El cultivo tolera bastante bien la sequía y los suelos ácidos e infértiles. Se recupera rápidamente de los daños causados por las plagas y enfermedades, y convierte de manera eficiente la energía solar en carbohidratos. Mientras que la parte comestible de los cereales alcanza como máximo el 35 % del peso total seco de la planta, en la yuca ese valor es del 80 %. Asimismo, la yuca puede sembrarse en cualquier época del año y su cosecha puede aplazarse varios meses o incluso un año. Los agricultores suelen por tanto mantener algunas plantas de yuca en el campo a modo de seguro contra la escasez imprevista de alimentos. No es de extrañar que la agricultura de subsistencia haya dado preferencia a la yuca en casi todas las regiones donde puede cultivarse, y se haya integrado así en las tradiciones y cocinas de esos lugares.

El cultivo de la yuca ofrece, no obstante, ciertas desventajas. El alimento posee una vida útil muy corta; y si no se procesan las raíces, se echan a perder en un día. Por otro lado, las plantas de yuca en una región determinada tienden a la uniformidad genética, lo que hace

ANDY CRAWFORD Getty Images

¿Quién cultiva la yuca?

La yuca es la planta preferida de los pequeños agricultores de subsistencia en las regiones tropicales, especialmente en Africa, donde se concentra más de la mitad de la producción mundial. Crece fácilmente a partir de pequeñas estacas, y tolera bien la sequía y los suelos infértiles. Sus raíces pueden recolectarse en cualquier época del año, por lo que representan un aporte seguro de calorías. La yuca, como los fideos, el pan o el arroz, acompaña otros platos típicos de las cocinas locales. En algunos países se cultiva con fines comerciales.

PRODUCCION ANUAL DE YUCA EN TONELADAS METRICAS
- Menos de 100.000
- Entre 100.000 y 1.000.000
- Más de 1.000.000

al cultivo vulnerable: una enfermedad o plaga que afecta a una planta se transmite con facilidad a sus vecinas. Pero, sobre todo, la pobreza en nutrientes, aparte de los carbohidratos, hace que no sea recomendable basar la dieta en la yuca.

Tecnología híbrida

Uno de los autores (Nassar) empezó a interesarse en la mejora de la yuca cuando era un joven agrónomo en su Egipto natal. A principios de los años setenta —una época de hambrunas en el Africa subsahariana— visitó Brasil para estudiar la planta en su hábitat natural. Entonces decidió mudarse a ese país y, con el tiempo, adoptó su nacionalidad. En 1975, la Universidad de Brasilia, con una pequeña subvención del Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo de Canadá, comenzó a reunir una colección de especies silvestres vivas de *Manihot* con la intención de aprovechar sus características ventajosas y mejorar la yuca. Viajando a través del país, a menudo a pie o en bicicleta, recolectó especímenes y los llevó de vuelta a Brasilia donde, junto con su grupo, lograría cultivar hasta 35 especies.

Esa fuente de biodiversidad ha sido y será muy importante en el desarrollo de nuevas variedades de yuca, tanto en nuestra universidad como en otros lugares. Uno de los primeros avances fue la obtención, en 1982, de un híbrido con un mayor contenido proteico. Las raíces de yuca presentan sólo un 1,5 % de proteínas (valor que alcanza el 7 %, o más, en el trigo); son pobres en aminoácidos sulfurados esenciales como la metionina, la lisina y la cisteína. En el híbrido de la yuca, la concentración de proteínas ascendió al 5 %. El gobierno brasileño intenta reducir la dependencia del país respecto al trigo foráneo mediante la adición de harina de yuca a la de trigo; de modo que el empleo de variedades de yuca con un alto contenido proteínico contribuiría a mantener la ingesta diaria de proteínas en millones de habitantes.

La hibridación entre la yuca y sus parientes silvestres, así como la reproducción selectiva entre diferentes tipos de yuca, ayudarán a desarrollar variedades que contengan otros nutrientes importantes. El equipo de la Universidad de Brasilia ha demostrado que ciertas especies silvestres de *Manihot* son ricas en aminoácidos esenciales, hierro, zinc y carotenoides, entre ellos, la luteína, el betacaroteno y el licopeno. El betacaroteno, en particular, constituye una fuente importante de vitamina A. Su deficiencia provoca una degeneración progresiva de la vista, un trastorno grave y generalizado en las regiones tropicales de Afri-

PERSPECTIVAS PARA EL MEJORAMIENTO

A pesar de que la yuca representa una fuente energética importante para muchos habitantes de los países pobres, una excesiva dependencia de ese alimento puede llevar a la desnutrición. Es una raíz muy pobre en proteínas, vitaminas A y E, hierro y zinc. La planta tiene otras desventajas:

- Posee una vida útil muy corta, si no se procesa.
- Se planta habitualmente mediante estacas, lo que origina uniformidad genética y vulnerabilidad ante las plagas y enfermedades.
- Si no se cocinan adecuadamente, algunas variedades pueden causar envenenamiento por cianuro, que lleva a una parálisis y al fallecimiento.

MAPPING SPECIALISTS; FUENTE: FAO (*mapa*); GETTY IMAGES (*almidón de tapioca*); CORTESIA DE NEIL PALMER *CIAT* (*tazón de almidón de yuca*); ANDRE BARANOWSKI *Getty Images* (*mandioca hervida*)

ca, Asia y Latinoamérica. Si se tiene en cuenta que la yuca constituye un alimento básico en los trópicos, algunas variedades con un alto porcentaje en carotenoides podrían contribuir a resolver la deficiencia de vitamina A en los países en vías de desarrollo. En los últimos tres años, el grupo de Brasilia ha desarrollado nuevos tipos de yuca muy productivos y con un contenido en betacaroteno hasta 50 veces superior al de la yuca normal. En la actualidad, esas variedades se hallan en fase de prueba, con la colaboración de los agricultores locales.

Otro proyecto importante se ha centrado en la modificación del ciclo reproductor de la planta. El modo de reproducción sexual ordinario de la yuca (por polinización) origina plántulas no idénticas a la planta madre, a menudo con un rendimiento inferior. Por ese motivo, los agricultores utilizan con frecuencia estacas de plantas de yuca para su propagación, en vez de sembrar semillas. No obstante, las estacas pueden contaminarse con virus o bacterias. Los microorganismos se acumulan generación tras generación y, al final, el rendimiento del cultivo se reduce. Al igual que otras plantas con flores, ciertas especies silvestres de *Manihot*, incluido el pariente arbóreo de la yuca *M. glaziovii*, se procrean sexual y asexualmente; las semillas de origen asexual germinan y dan lugar a plantas que son básicamente clones de la planta madre. Después de una década de esfuerzos centrados en cruzamientos interespecíficos, los investigadores de la Universidad de Brasilia han obtenido un tipo de yuca que se reproduce tanto sexual como asexualmente y, lo mismo que su pariente silvestre, forma ambos tipos de semillas. En cuanto el estudio finalice, la nueva variedad estará lista para su distribución entre los cultivadores de yuca.

La especie *M. glaziovii* posee otros genes útiles que pueden mejorar la alimentación de millones de habitantes en las zonas áridas. Los híbridos entre *M. glaziovii* y la yuca exhiben dos tipos de raíces. Algunas, como las de la yuca, aumentan de volumen al acumular almidón y son comestibles. El segundo tipo de raíz se hunde más en el suelo y obtiene el agua a una mayor profundidad. Esas características hacen de los híbridos las mejores variedades para las regiones semiáridas, como el noroeste de Brasil o ciertas regiones de la sabana del Africa subsahariana. Algunos han demostrado su tolerancia a la sequía, en las pruebas realizadas por los agricultores de Petrolina, una de las regiones más secas de Brasil. El equipo de la Universidad de Brasilia está mejorando esos híbridos con el propósito de reunir en una planta un alto rendimiento y tolerancia a la sequía; para ello recurren al retrocruzamiento con una variedad productiva y la posterior selección de la progenie que ofrece un mayor rendimiento, con una posibilidad de distribución más amplia.

Una clase diferente de manipulación (la antigua técnica del injerto) representa otra opción para incrementar la cosecha de las raíces tuberosas de la yuca, como ya habían descubierto los agricultores indonesios en los años cincuenta. Al injertar tallos de especies como *M. glaziovii* o *M. pseudoglaziovii* (o los híbridos de ambos) en patrones de la yuca se ha incrementado hasta siete veces la producción de raíces en parcelas experimentales. Desafortunadamente, en muchos países esta práctica de injerto se ve obstaculizada por la falta de disponibilidad de híbridos.

Los autores

Nagib Nassar, natural de El Cairo, se doctoró en genética en la Universidad de Alejandría. Desde 1975, investiga la yuca en la Universidad de Brasilia. Ha obtenido variedades mejoradas de ese cultivo, adoptadas por agricultores de Brasil y utilizadas por otros fitomejoradores de Africa. **Rodomiro Ortiz** nació en Lima. Se doctoró en fitomejoramiento y genética en la Universidad de Wisconsin, Madison. Es ex director de movilización de recursos del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo en Texcoco.

Protección frente a las plagas

Más allá de mejorar la calidad nutritiva y aumentar el rendimiento de la yuca, el mejoramiento selectivo y los cruzamientos interespecíficos con especies silvestres han sido cruciales para frenar la propagación de las plagas y las enfermedades. La mayor resistencia al virus del mosaico de la yuca constituye uno de los logros más importantes en la investigación de ese cultivo. En los años veinte, la propagación del virus en el territorio oriental de Tanganica (hoy Tanzania) desencadenó una hambruna. Dos científicos británicos establecidos en Tanzania cruzaron la yuca con *M. glaziovii* y

1. UN AGRICULTOR DE YUCA inspecciona su cultivo en Huila, en los Andes colombianos.





Combinar técnicas antiguas y modernas

Los parientes silvestres de la yuca, incluida la planta arbórea *Manihot glaziovii* (*izquierda*), suelen poseer genes que podrían mejorar el cultivo, pero carecen de otras características ventajosas de la especie cultivada. Con la antigua técnica del retrocruzamiento, los fitomejoradores reúnen en una planta todos los rasgos deseados. Producen un gran número de generaciones de híbridos, a menudo con la ayuda de herramientas modernas, como los marcadores genéticos, que revelan la presencia de una característica en la plántula sin necesidad de obtener la planta adulta.

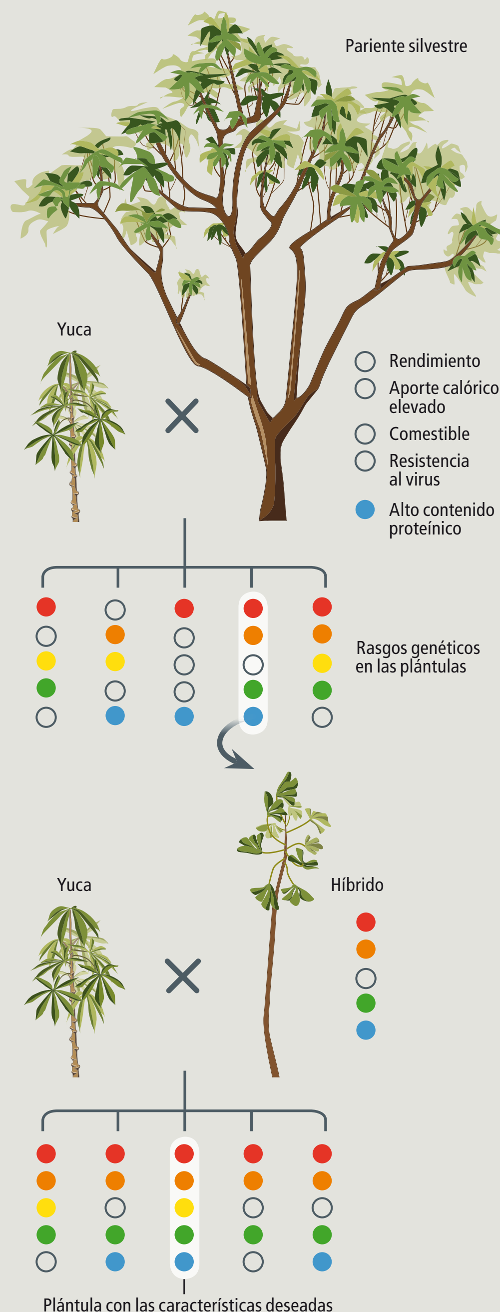
¿COMO FUNCIONA LA SELECCION ASISTIDA POR MARCADORES?

❶ Identificar los marcadores genéticos de las características deseadas, tanto en la yuca como en su pariente silvestre (un punto coloreado indica la presencia del marcador).

❷ Realizar los cruzamientos y analizar las características genéticas de las plántulas. Cada plántula presentará una combinación aleatoria de los rasgos.

❸ Obtener una planta adulta de la plántula híbrida deseada y cruzarla nuevamente con la yuca.

❹ Realizar el análisis genético de las plántulas resultantes: algunas poseerán todas las propiedades deseadas. (Los cruzamientos podrán repetirse durante varias generaciones hasta conseguir los rasgos deseados.)



salvaron ese cultivo después de siete años de esfuerzos. En la década de los setenta, el virus del mosaico volvió a amenazar vastas áreas de Nigeria y Zaire (hoy la República Democrática de Congo). Los investigadores del Instituto Internacional de Agricultura Tropical (IITA) de Nigeria utilizaron *M. glaziovii* e híbridos de la colección de la Universidad de Brasilia y crearon nuevas plantas resistentes al virus. Ese último híbrido dio origen a una familia de variedades resistentes al virus del mosaico de la yuca que hoy se siembran en más de cuatro millones de hectáreas del Africa subsahariana; en las décadas siguientes, Nigeria se convirtió en el primer productor mundial del cultivo. Sin embargo, los virus experimentan frecuentes mutaciones genéticas; quizás algún día aparezcan nuevas cepas del virus que terminen con la resistencia introducida en esas variedades. El fitomejoramiento preventivo representa por tanto, una medida necesaria para mantener la enfermedad bajo control.

El piojo harinoso (*Phenacoccus manihoti*) es una de las plagas más virulentas que afectan al cultivo de la yuca en el Africa subsahariana. Este insecto, que mata las plantas por la succión de su linfa, resultó especialmente devastador en la década de los setenta y comienzos de los ochenta; destruyó plantaciones y viveros hasta tal punto que la producción de yuca llegó casi a cesar. A finales de los setenta, el IITA y sus socios en Africa y América del Sur introdujeron una avispa depredadora sudamericana que depositaba sus huevos en el piojo harinoso, de modo que las larvas terminaban por devorar a los piojos harinosos desde su interior. Gracias a esa estrategia, en los ochenta y noventa se detuvo la plaga en la mayoría de las zonas productoras de yuca de Africa. En algunas regiones pequeñas de Zaire, ese sistema de control biológico fracasó debido a un aumento de los parásitos de la avispa. A mediados del decenio pasado, el equipo de la Universidad de Brasilia buscó entre las especies silvestres de *Manihot* nuevas fuentes de resistencia al piojo; las encontró, una vez más, en *M. glaziovii*. Los pequeños agricultores de la región que rodea Brasilia siembran ahora las variedades resistentes al piojo harinoso; las nuevas plantas pueden exportarse a otros países que se vean afectados una vez más por la plaga.

De cara al futuro, otra estrategia para obtener rasgos valiosos de la yuca consiste en el empleo de quimeras. Una quimera es un organismo en el que crecen dos o más tejidos genéticamente distintos. Existen dos tipos principales de quimeras. Las quimeras sectoriales poseen dos sectores longitudinales diferentes en un órgano de la planta; uno de ellos crece más

JESSICA HUPPI (*ilustraciones*); CORTESIA DE FOREST Y KIM STARR (*fotografía*)

La ruta biotecnológica

La ingeniería genética, adoptada hoy ampliamente en la agricultura de EE.UU., empieza a dar resultados en la yuca. Sin embargo, la disponibilidad inmediata de las variedades transgénicas es poco probable y algunos temen que la financiación de la investigación deje de lado los métodos más baratos de fitomejoramiento clásico.

Los principales avances en la investigación biotecnológica de la yuca proceden de la colaboración internacional BioCassava Plus. Ese grupo ha desarrollado nuevos tipos de yuca con mayores contenidos de zinc, hierro, proteínas, betacaroteno (fuente de vitamina A) y vitamina E utilizando genes de otros organismos, entre ellos, algas, bacterias y otras plantas.



2. PLANTONES DE YUCA genéticamente modificados.

"Hemos alcanzado nuestro objetivo", afirma Richard Sayre, investigador principal de BioCassava Plus y del Centro de Investigación Agraria Donald Danforth en St. Louis. Todas las variedades transgénicas nuevas de yuca se están ensayando ahora en parcelas de experimentación en Puerto Rico. Asimismo, se ha dado luz verde al programa para comenzar estudios de campo en Nigeria. Sayre comenta que el fitomejoramiento clásico puede aumentar el contenido de betacaroteno en la yuca, pero la manipulación genética es la única técnica que hasta ahora ha conseguido elevar el contenido de hierro y zinc. Mientras tanto, el equipo de Sayre está trabajando para combinar las nuevas características en una sola variedad.

El proyecto está financiado por la Fundación Bill & Melinda Gates y por Monsanto. (El apoyo de Monsanto vino condicionado: la corporación se reserva el derecho de cobrar por el uso de las variedades transgénicas si los ingresos brutos del agricultor exceden los 10.000 dólares anuales.)

Peter Beyer, de la Universidad de Friburgo, en Alemania, señala que los resultados obtenidos por BioCassava Plus constituyen un gran logro. "Sin embargo, la aplicación práctica de los mismos aún está lejos", añade. Beyer lo sabe muy bien: el "arroz dorado" que su grupo describió en el año 2000 y fue objeto de la portada de la revista *Time*, tan sólo está a punto de aprobarse en algunos países. La manipulación genética de organismos puede ser rápida, apunta, pero demostrar su inocuidad en el ambiente y el consumidor, y conseguir variedades apetecibles para la población local conlleva tiempo, de 10 a 12 años. "Los reguladores no permiten proceder tan rápido como con una variedad obtenida con los métodos tradicionales", declara Beyer.

Aparte de no ser siempre más rápida que el fitomejoramiento clásico, la manipulación genética es mucho más cara, y algunas veces los transgenes que funcionan en un organismo no funcionan tan bien en otro. "Varias personas han confiado en exceso en la promesa de la ingeniería genética", opina Doug Gurian-Sherman de la Unión de científicos comprometidos. De ahí que esa tecnología tienda a recibir una gran parte de los fondos destinados a la investigación agrícola. "Creo que jugársela a una sola carta es un gran error", indica, y añade que las agencias públicas de financiación deberían contribuir a restablecer el equilibrio.

—Davide Castelvecchi

deprisa que el otro y termina por extenderse en todo el vástago. En el segundo tipo, las quimeras periclinales, la parte externa del vástago envuelve la parte interna. El crecimiento de la quimera periclinal suele ser más estable que el de la sectorial. En Brasilia se intenta desarrollar un método de injerto que producirá tejido de *M. glaziovii*, una quimera periclinal estable. Este enfoque permitirá el crecimiento continuo de la raíz cada vez que se introduzca en la planta un tallo de la quimera. Las quimeras han demostrado hasta ahora un rendimiento elevado y parecen adaptarse bien en las zonas semiáridas.

Aunque la investigación agrícola debería dar preferencia al cultivo de la yuca, tradicionalmente no ha sucedido así. Sólo unos cuantos laboratorios han estudiado la planta, quizá porque se cultiva en los trópicos, lejos de donde trabajan los científicos de los países del mundo desarrollado. Esa escasa dedicación se ha traducido en unos rendimientos promedios inferiores a las 14 toneladas por hectárea en Latinoamérica y en Africa. Sin embargo, los experimentos de campo revelan que, con algunas mejoras, la yuca puede rendir cuatro veces más y alimentar a muchas más personas, no sólo allí donde se cultiva ahora sino en otras partes del mundo.

No obstante, la planta está empezando a despertar cierto interés en el mundo desarrollado. Los investigadores del Centro de Investigación Agraria Donald Danforth en St. Louis están liderando un proyecto para insertar en la yuca transgenes procedentes de otras especies de plantas o de bacterias, con el propósito de incrementar su valor nutritivo y extender su tiempo de conservación (*véase el recuadro* "La ruta biotecnológica").

La secuenciación del genoma de la yuca, de la que existe un primer borrador, a buen seguro impulsará el desarrollo de la yuca transgénica. También ayudará a los programas de fitomejoramiento clásicos: la técnica de selección asistida por marcadores, que depende de la información obtenida de un análisis genético, permitirá seleccionar las características deseadas. El establecimiento de una red global para coordinar los esfuerzos de todas las instituciones involucradas en la investigación de la yuca aseguraría el aprovechamiento máximo del cultivo.

CORTESIA DE SHANTHA J. R. PIERIS

Bibliografía complementaria

MEJORA GENETICA DE CEREALES. Stephen A. Goff y John M. Salmeron en *Investigación y Ciencia*, n.º 337, págs. 6-13; octubre 2004.

VUELTA A LA AGRICULTURA PERENNE. Jerry D. Glover, Cindy M. Cox y John P. Reganold en *Investigación y Ciencia*, n.º 373, págs. 66-73; octubre 2007.

FAILURE TO YIELD: EVALUATING THE PERFORMANCE OF GENETICALLY ENGINEERED CROPS. Doug Gurian-Sherman. Union of Concerned Scientists, 2009.

El viento y la dispersión de las plantas



CONCEPTOS BASICOS

- La disponibilidad de datos tomados por satélites y la aplicación de métodos de análisis espacial permiten hoy resolver problemas que antes no podían someterse a experimentación.
- Mediante el análisis conjunto de datos eólicos y botánicos clásicos se han puesto a prueba varias hipótesis sobre la semejanza florística entre lugares del hemisferio sur.
- Los resultados muestran que la dispersión eólica es el mecanismo que mejor explica la semejanza entre floras de lugares muy alejados entre sí para musgos, hepáticas, líquenes y helechos.

A la dispersión eólica cabe atribuir la sorprendente semejanza entre las floras del hemisferio sur

Angel M. Felicísimo y Jesús Muñoz

El conocimiento científico avanza a través de hipótesis que se van confirmando o se rechazan en el crisol de la experimentación. Pero abundan las hipótesis que, sin estar contrastadas, han generado numerosos estudios. Las causas son diversas: la complejidad del fenómeno, la escala espacial y temporal o la simple falta de datos. Hace unos años nos planteamos abordar una de esas cuestiones sin contrastar. El problema, aunque debatido durante más de 150 años, carecía de soporte empírico: ¿a qué se debe la semejanza o diferencia de las floras observadas en diferentes lugares del planeta? Si examinamos la composición florística de distintos lugares del mundo encontramos parecidos y diferencias. Algunas áreas comparten la mayoría de las especies; otras, presentan una composición específica distinta del resto.

Los reinos vegetales clásicos representan las grandes tendencias de la flora más conspicua. A pesar de su reducido tamaño, Sudáfrica constituye por sí misma un reino (Capense) en razón de su peculiaridad. Su conexión con el resto del continente africano no le ha impedido mantener una identidad propia. Pero reinos, regiones y demás clases son la representación del fenómeno, no su explicación. Es necesario hallar —y demostrar— un mecanismo que explique la distribución de las especies.

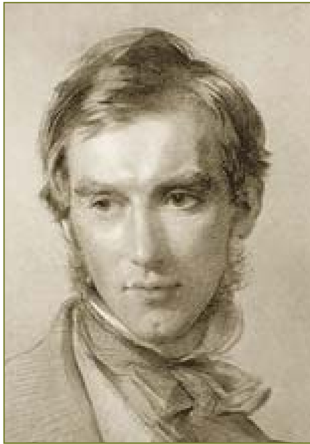
Las tres hipótesis

Se han propuesto tres explicaciones del fenómeno: la “hipótesis de la vicarianza”, la “dispersión a larga distancia” y la “hipótesis geodésica”.

La hipótesis de la vicarianza fue avanzada, en los años setenta, por León Croizat, Gareth Nelson y Donn E. Rosen para explicar la filogenia. Proponía que las semejanzas y diferencias actuales de floras y faunas dependían de la historia geológica de los continentes.

En el hemisferio sur, hace unos 135 millones de años (finales del Jurásico), los continentes actuales, hasta entonces unidos en el supercontinente Gondwana, comenzaron a separarse. Los movimientos tectónicos de grandes bloques de corteza terrestre continúan hoy; Australia se desplaza unos 5 centímetros cada año. Cuando se separan dos bloques, las poblaciones quedan aisladas y evolucionan de forma independiente, diferenciándose poco a poco.

Según la hipótesis de la vicarianza, las floras de dos lugares se parecerán más cuanto más reciente sea la separación geológica de éstos. Si se produjo la separación hace mucho tiempo, las floras habrán dispuesto de mayores posibilidades de evolución y especiación divergentes. Si la separación es reciente, las poblaciones habrán permanecido conectadas genéticamente durante más tiempo; ambos lugares compartirán, pues, un número mayor de especies.



1. JOSEPH DALTON HOOKER propuso ya a mediados del siglo XIX el viento como mecanismo de dispersión para explicar la presencia de organismos en las islas que visitó durante su viaje antártico. Retrato de George Richmond, 1855.

Los autores

Angel Manuel Felicísimo, doctor en biología por la Universidad de Oviedo, centra su investigación en el desarrollo de modelos espaciales y su aplicación a problemas biológicos y ambientales. Trabaja en el Departamento de Expresión Gráfica de la Universidad de Extremadura. **Jesús Muñoz**, doctor en biología por la Universidad Autónoma de Barcelona, se dedica a la sistemática y biodiversidad de musgos, en el Real Jardín Botánico de Madrid. Es también investigador asociado del Jardín Botánico de Missouri, en Saint Louis.

La hipótesis de "dispersión a larga distancia" propone que algunas especies son transportadas por el viento hasta miles de kilómetros de la zona de origen. El proceso permite la colonización de lugares muy alejados. El mecanismo es aplicable a especies cuyos individuos son ligeros y a las que pueden propagarse mediante pequeños fragmentos. Quedan excluidas las especies vegetales con semillas voluminosas y pesadas, y las aves que pueden oponerse al viento como albatros o petreles.

¿Cómo se refleja el efecto de los vientos? La eficacia del viento para conectar áreas geográficas distantes depende de su velocidad y sentido. Dos lugares, aunque alejados entre sí, estarán conectados cuando exista un flujo de viento fuerte que lleve directamente del uno al otro. De forma inversa, dos lugares próximos pueden hallarse aislados, si no existe viento o cuando la dirección del mismo sea perpendicular a la línea que los une. Ello explicaría la presencia de especies comunes en lugares que nunca han estado próximos geográficamente.

Una diferencia relevante entre las dos hipótesis anteriores atañe al aspecto temporal. La primera (vicarianza) parte de la idea de que la distribución de las especies depende, en esencia, de un proceso histórico de millones de años. La segunda (dispersión a larga distancia), en cambio, defiende que son mecanismos recientes los que mejor explican dicha distribución: la semejanza florística guardaría una estrecha relación con los patrones de flujo de vientos, patrones que son contemporáneos.

Según la "hipótesis geodésica", el parecido florístico entre dos lugares será una función inversa de la distancia entre ellos. Estas distancias cambian debido a la deriva continental; de ahí que la hipótesis incluya también el factor histórico. No niega la conexión eólica, pero da por supuesto que la resultante de los flujos no tiene un componente direccional preferente: a medio o largo plazo, el viento conecta todo con todo, de modo que la probabilidad de propagación depende sólo de la distancia.

Las dos primeras hipótesis constituyen objeto de debate desde hace decenios. La tercera se propuso en fecha más reciente (2001); apenas si se ha reflexionado sobre la misma. Nos propusimos comprobar si alguna de ellas explicaba la semejanza florística observada en un conjunto de lugares del hemisferio sur muy lejanos entre sí.

En nuestra concepción del trabajo científico, la "verosimilitud" es un término estadístico: los buenos argumentos son convenientes pero no suficientes, por lo que resulta imprescindible comparar y contrastar con la realidad (datos experimentales) los resultados predichos por cada hipótesis (datos teóricos).

El escenario

La zona elegida para el experimento se extendía entre la costa del continente Antártico y los 30º de latitud sur, alrededor de un 25 por ciento de la superficie de la Tierra mayoritariamente cubierta por océanos. En esa amplia zona elegimos 27 lugares, sobre los cuales había datos biológicos suficientes para realizar los análisis. Una parte correspondía a zonas continentales, pero la mayoría eran islas oceánicas.

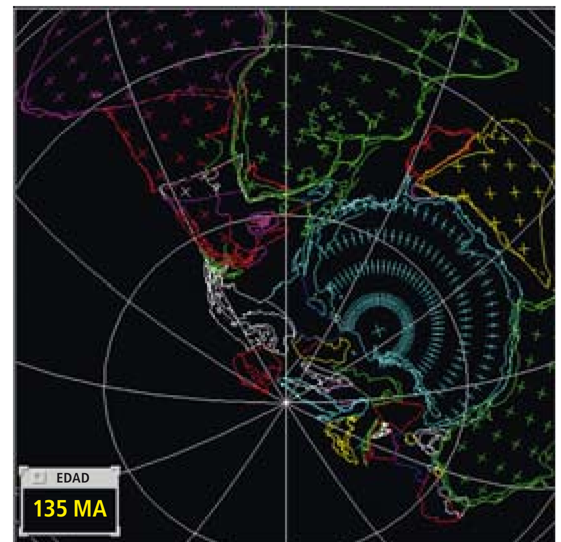
El hemisferio sur ofrece un escenario de experimentación privilegiado. Por un lado, comprende zonas de muy diversas edades geológicas, desde muy antiguas hasta recentísimas surgidas por vulcanismo o movimientos tectónicos. Algunas formaron parte de Gondwana; otras no. Por otra parte, las localidades se hallan aisladas por el mar, lo que elimina la posibilidad de un transporte por etapas que aumentaría de forma notable el ruido en el experimento.

Los actores

Elegimos cuatro grupos taxonómicos bien representados en la zona: musgos, hepáticas, líquenes y helechos. Los briófitos (musgos y hepáticas), junto con los líquenes, poseen la capacidad de dispersarse mediante fragmentos. Esta forma de reproducción asexual facilita la colonización porque incluso fragmentos minúsculos pueden ser viables si las condiciones climáticas y edáficas en el destino son favorables. Además, los fragmentos son más resistentes que las esporas a las duras condiciones ambientales en que puede producirse la dispersión (bajas temperaturas o intensa radiación ultravioleta).

Los helechos, en cambio, se dispersan a través de esporas. El método dificulta extraordinariamente la colonización, ya que para

FUENTE: "LIFE AND LETTERS OF SIR JOSEPH DALTON HOOKER", POR LEONARD HUXLEY, LONDRES, JOHN MURRAY, 1918



cerrar el ciclo reproductivo deben coincidir en el espacio y en el tiempo dos gametófitos de sexo distinto.

Los datos

Recopilamos y procesamos cuatro tipos de datos: biológicos, geológicos, eólicos y geográficos. Los datos biológicos consistieron en listas de presencia (o ausencia) de las especies; se elaboraron a partir de la bibliografía preexistente y de peticiones a expertos. A partir del número de especies comunes, o no, se construyó una matriz de semejanza para cada grupo taxonómico (las matrices se obtienen mediante el índice de Ochiai, que se calcula a partir de una tabla de especies presentes o ausentes en cada par de lugares). La fiabilidad de los índices de semejanza florística es función, entre otros factores, del número de especies incluidas. En nuestro estudio se analizaron un total de 1851 especies: 601 musgos, 597 hepáticas, 597 líquenes y 192 helechos.

Los datos geológicos corresponden al tiempo que llevan separadas las localidades estudiadas. El índice de similitud es inversamente proporcional a este tiempo. Valores próximos a 0 indican una separación temprana (en nuestro caso, unos 135 millones de años); valores próximos a 1 revelan una separación reciente. A las islas volcánicas, que nunca formaron parte de Gondwana, se les asignó un tiempo de separación infinito (índice de similitud cero). Si la hipótesis de la vicarianza fuera cierta, esta matriz de semejanza geológica guardaría una estrecha relación con las matrices de semejanza florística.

Para comprobar la hipótesis de dispersión por viento es necesario calcular la conectividad eólica entre las localidades. Los datos básicos provienen del QuikSCAT, un satélite lanzado por la NASA en junio de 1999. En este satélite viaja SeaWinds, un sensor que mide los vientos oceánicos; para ello envía desde su órbita, a 803 kilómetros de altura, breves pulsos de microondas sobre la superficie terrestre y recoge sus ecos. Se sabe que la superficie del mar es tanto más rugosa cuanto mayor es la velocidad del viento. Y una superficie rugosa dispersa en mayor medida que otra lisa las señales de microondas. Por tanto, puede emplearse la intensidad del eco recibido, que depende de la rugosidad de la superficie marina, para estimar la velocidad del viento en ese momento.

Disponemos de datos diarios de viento que cubren el 90 por ciento de la superficie terrestre. (El Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA los pone a disposición pública y gratuita en Internet a través del centro de distribución PO.DAAC, de "Physical Oceanography Distributed Active Archive Center".) La resolución temporal es, por tanto, muy buena. Con todo, debido a las trayectorias orbitales, quedan sin cubrir ciertas áreas oceánicas en forma de husos, orientados norte-sur. El inconveniente se resuelve con la combinación de datos de un mínimo de tres días consecutivos.

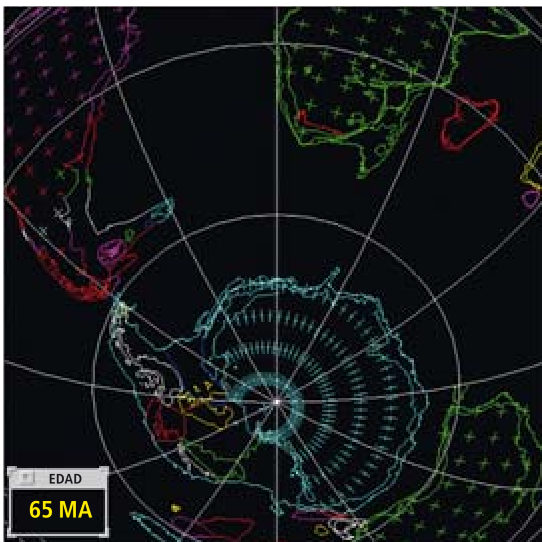
Utilizamos la totalidad de los datos de viento disponibles en el momento del trabajo, es decir, casi cuatro años de información diaria: desde junio de 1999 hasta marzo de 2003. En la actualidad, seguimos recogiendo y agregando datos con una periodicidad semestral.

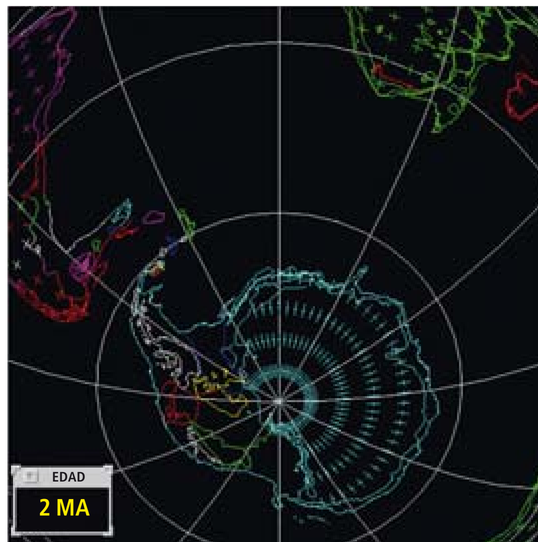
Sin embargo, los datos de viento no nos permitían calcular directamente los valores de conectividad entre los lugares estudiados. Mediante un método de cálculo que operaba sobre campos de vectores, obtuvimos los modelos de coste anisotrópico.

Modelos de coste

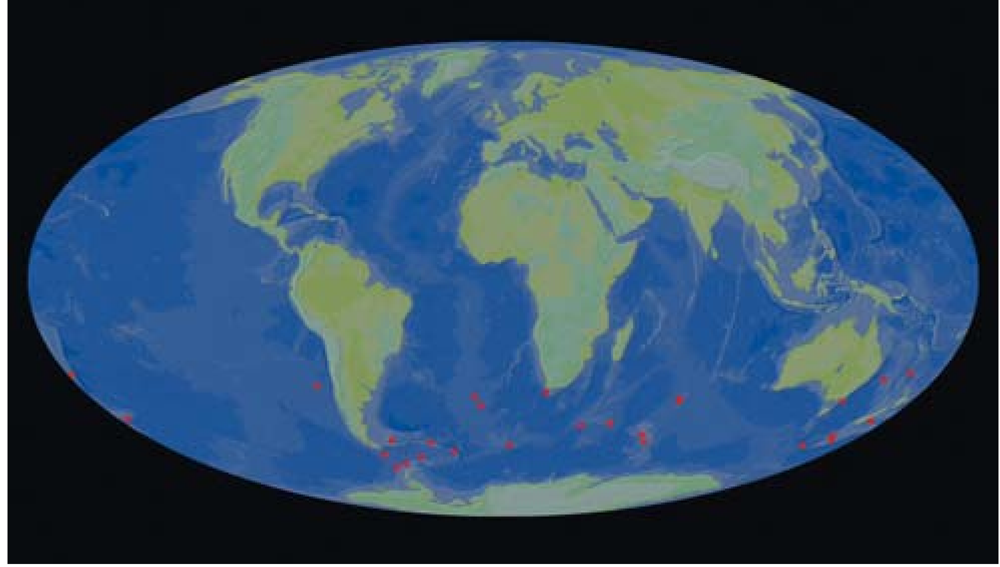
Un modelo de coste es, en esencia, un mapa donde cada punto del terreno tiene un valor

FUENTE: THE PLATES PROJECT, INSTITUTO DE GEOFISICA DE LA UNIVERSIDAD DE TEXAS





2. HACE 135 MILLONES DE AÑOS, en la transición del Jurásico al Cretácico, los actuales continentes del hemisferio sur se hallaban unidos en el supercontinente Gondwana. La fragmentación de Gondwana hizo que las grandes placas de corteza terrestre se desplazaran de forma lenta y continua en un proceso que continúa en la actualidad. La placa de lo que hoy es la India (que chocó luego con Eurasia) estaba unida a Madagascar, Africa y la Antártida. La fragmentación afectó primero a la unión con estas dos últimas (hace unos 120 millones de años). La separación de la India y Madagascar se produjo hace unos 85 millones de años. Según la hipótesis vicariancista, la semejanza de las floras es función inversa del tiempo de separación de las placas ya que, una vez separadas, la especiación se realiza de forma independiente por la falta de intercambio genético entre las poblaciones.



3. UBICACION de las 27 localidades incluidas en el estudio.

que representa el coste o resistencia que supone ir desde un origen a ese punto. Supongamos que queremos recorrer en bicicleta una ruta de 20 kilómetros en tres días consecutivos. El camino es llano, pero no recto. El primer día el viento está en calma. Tardamos 60 minutos. El esfuerzo es constante ya que, en ausencia de viento, no depende de la dirección de nuestro movimiento. Se habla entonces de un "coste isotrópico": el esfuerzo no depende de la dirección del movimiento.

El segundo día, en cambio, sopla un viento del norte moderado y constante, de 6 metros por segundo. Nuestro esfuerzo es entonces irregular, ya que depende de la dirección de avance. Si vamos hacia el sur, el viento reduce el coste; si vamos hacia el este o el oeste, no nos afectará; pero si nos dirigimos hacia el norte, el viento se opondrá a nuestro avance, incrementando el esfuerzo. Este segundo caso ofrece un ejemplo de "coste anisotrópico", es decir, dependiente de la dirección del movimiento. El tiempo invertido puede ser mayor o menor que en el caso isotrópico, ya que depende de la suma de esfuerzos en todos los tramos del trayecto.

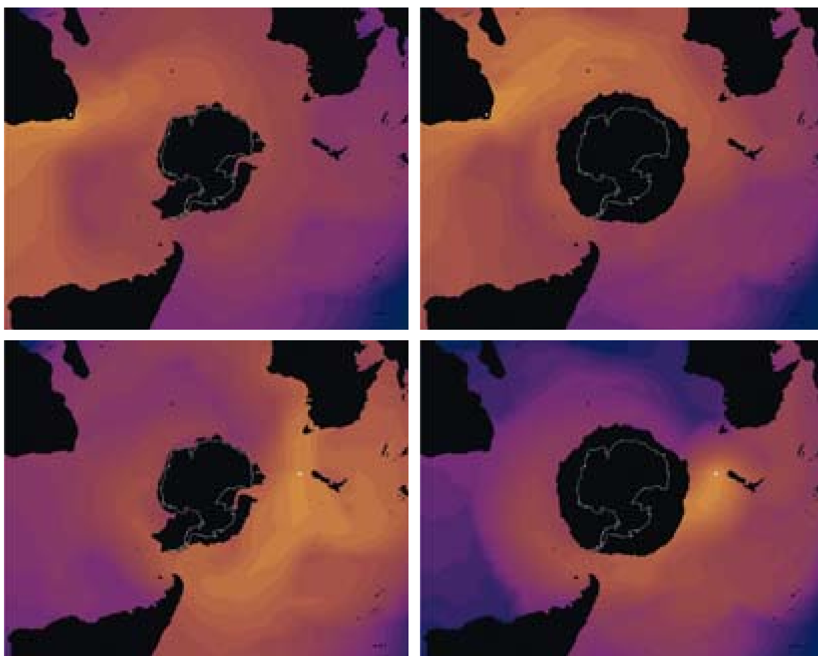
El tercer y último día, el viento sopla con velocidad y dirección cambiantes. Como en el caso anterior, el esfuerzo total debe integrarse tramo a tramo; sin embargo, ahora depende también del momento de salida. La dificultad del trayecto puede cambiar con el tiempo, ya que el viento también lo hace: donde en un momento se oponía al movimiento, puede facilitarlo algo más tarde.

La hipótesis de la dispersión a larga distancia sería análoga al caso anterior (viento de velocidad y dirección cambiantes), salvo en la intervención de los actores (esporas y fragmentos son viajeros "pasivos"). Calculamos el coste mínimo de llegar desde cada localidad hasta las demás a través del campo de vientos. El coste será bajo (y la conectividad elevada), si los vientos se dirigen de una localidad a la otra a velocidades altas. Vientos suaves y con direcciones inadecuadas aumentarán el coste.

A partir de ese principio, estimamos la conectividad entre los lugares estudiados. Calculamos los modelos de coste desde cada uno de los 27 posibles orígenes al resto de localidades. Para ello, utilizamos un sistema de información geográfica (SIG), repitiendo el análisis a intervalos de 10 días durante los casi cuatro años de medidas disponibles. Obtuvimos así 139 conjuntos de 27 modelos de coste, que representaban la conectividad entre cada una de las 27 localidades seleccionadas y el resto de la zona en estudio.

Dada la variabilidad del viento, era previsible que las conectividades entre dos localidades divergieran a lo largo del tiempo. A modo de síntesis de la serie temporal, se construyó una matriz que recogía los valores de máxima conectividad observada entre cada par de localidades para el período 1999-2003.

Por fin, se calcularon los datos de distancia geográfica entre las 27 localidades. Estos datos no plantearon problemas, ya que obe-



4. LOS MODELOS DE COSTE indican la resistencia que debemos vencer para ir de un punto a otro. Cuanto menor sea el coste de un punto, más conectado estará con el resto. Las imágenes corresponden a Sudáfrica (*arriba*) y a la isla de Auckland (*abajo*), a mediados de noviembre de 2003 (*columna derecha*) y enero de 2004 (*columna izquierda*). Las zonas en negro corresponden a tierra o, alrededor de la Antártida, a hielo. La conectividad varía entre 0 (mínimo, *azul oscuro*) y 1 (máximo, *naranja*); es adimensional.

ANGEL M. FELICISIMO Y JESUS MUÑOZ









CORTESIA DE UGARTE-REAL JARDIN BOTANICO (*helecho, hepática*); UNIVERSIDAD CATOLICA DE LEUVEN (*liquen*); JAN PETER FRAHM-UNIVERSIDAD DE BONN (*musgo*)

5. CUATRO GRUPOS TAXONOMICOS han centrado este estudio sobre la distribución de especies vegetales: helechos (*a*), hepáticas (*b*), líquenes (*c*) y musgos (*d*). Los helechos forman, junto con los equisetos (colas de caballo), los pteridófitos. Musgos y hepáticas son las dos clases que forman los briófitos. Los líquenes resultan de la simbiosis entre algas y hongos.

decían a fórmulas geodésicas simples y bien conocidas.

Obtuvimos un conjunto de matrices de semejanzas entre las localidades analizadas. Las cuatro primeras reflejaban la semejanza florística para los cuatro grupos taxonómicos estudiados. Otra correspondía a la semejanza esperada de acuerdo con la hipótesis de la vicarianza. Una más sintetizaba la conectividad por vientos de 1999 a 2003. La última matriz expresaba la proximidad geográfica. El siguiente paso consistiría en medir la asociación entre las matrices florísticas y las que representaban a cada una de las tres hipótesis.

Métodos estadísticos

El objetivo del proceso estadístico es medir el grado de asociación entre las matrices de semejanza. Entre las opciones estadísticas disponibles utilizamos una técnica que se componía de dos etapas: escalamiento multidimensional y transformación de Procrustes.

El escalamiento multidimensional permite elaborar mapas a partir de matrices de semejanza o, sus inversas, las distancias. Un ejemplo aclarará el concepto. Supongamos que disponemos de las distancias en kilómetros por carretera entre cinco ciudades. Organizamos las distancias en forma de matriz y sometemos ésta a un escalamiento multidimensional. Se obtiene, para cada ciudad, un par de coordenadas que la representan gráficamente en un mapa. Las localizaciones se calculan de forma que respeten al máximo las distancias originales.

Aplicamos esa técnica a todas las matrices: la de semejanza florística, la de conectividad eólica, la de semejanza debida a la vicarianza y la de proximidad geográfica. Obtuvimos así los correspondientes mapas, tridimensionales.

Utilizamos el escalamiento multidimensional porque disponíamos de una técnica idónea para la comparación de mapas, la transformación de Procrustes. Esta técnica superpone dos mapas e intenta, median-

te giros, traslaciones y cambios de escala, ajustarlos lo mejor posible. Los residuos, un elemento estadístico, expresan el éxito de la operación; pueden emplearse para estimar el grado de asociación entre las matrices que dieron origen a los mapas.

Se aplicó la transformación de Procrustes a todos los pares de mapas de semejanza florística con la conectividad máxima, la distancia geográfica y los tiempos de separación geológica.

Resultados

Los resultados corresponden a los valores de ajuste entre las matrices y su significación estadística. La significación estadística se expresa mediante *P*, la probabilidad de que los ajustes observados se deban al azar, es decir, de que no reflejen relaciones reales entre las matrices originales. Volviendo al caso de las ciudades españolas, la significación del ajuste obtenido mediante la transformación de Procrustes es de 0,005. Ello significa que la probabilidad de que el ajuste observado se deba al azar y no a una relación real es de sólo un 0,5 por ciento. O, dicho de otra forma, si creásemos las matrices de distancias y tiempos con números aleatorios, sólo en 5 de cada mil casos obtendríamos una relación como la observada. La significación en este caso es, por tanto, muy satisfactoria.

Comparamos los valores de *P* para las tres hipótesis estudiadas. La más verosímil sería la que presentase mayor significación (menor valor de *P*). Los resultados mostraron que la hipótesis de la dispersión a larga distancia por el viento presentaba unos valores de ajuste notablemente significativos y siempre mayores que las hipótesis alternativas. Sólo en el caso de los helechos, la distancia geográfica mostraba una significación estadística equivalente.

¿COMO SE MIDEN LOS VIENTOS OCEANICOS?

La escaterometría mide el viento mediante el envío de pulsos de microondas (radar) sobre la superficie del mar y el registro de la difusión de sus ecos. La difusión depende de la rugosidad de la superficie marina y ésta, a su vez, de la velocidad del viento. Por tanto, la intensidad del eco, que depende de la rugosidad, puede utilizarse para estimar la velocidad del viento en ese instante.



Satélite QuikSCAT

LABORATORIO ESPACIAL

Los datos escaterométricos proceden del satélite QuikSCAT, lanzado por la NASA el 19 de junio de 1999 desde California. En él viaja SeaWinds, un sensor que mide la velocidad y dirección del viento a baja altura sobre los océanos. Este tipo de datos arroja luz sobre las interacciones entre la atmósfera y el mar, las corrientes oceánicas y fenómenos cíclicos, como El Niño.

SeaWinds barre el océano en trayectorias espirales mediante el envío de pulsos del radar de 13,4 gigahertz con una frecuencia de 189 ciclos por segundo y 110 watt de potencia. La dirección del viento se determina buscando el ángulo más consistente con varias mediciones de retorno de pulsos polarizados tomadas en ángulos distintos. Los vectores de viento se estiman con un error de unos 2 metros por segundo (velocidad), 20 grados (dirección) y 25 kilómetros (resolución espacial).

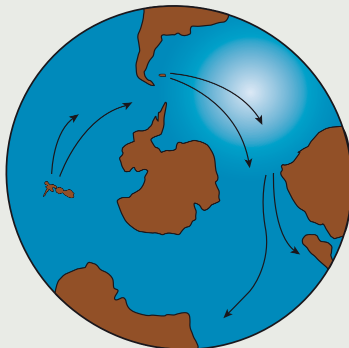
Las nubes son transparentes a las microondas, por lo que los escaterómetros pueden trabajar en un amplio rango de condiciones meteorológicas y en cualquier momento del día o la noche.

Cuanto mayor sea la velocidad del viento, mayor será la rugosidad de la superficie del mar y menor la intensidad del eco recibido por el sensor.

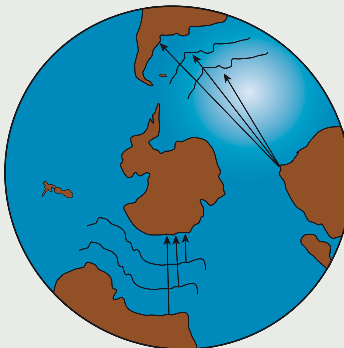
LABORATORIO DE PROPULSION A CHORRO, NASA (*satélite*)

COMPARACION DE HIPOTESIS

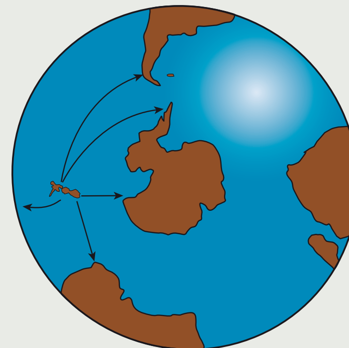
Existen tres hipótesis que explican la distribución de las especies: la hipótesis de la vicarianza, la dispersión eólica a larga distancia y la hipótesis geodésica. Para averiguar cuál es la más verosímil, se han analizado las descripciones que éstas ofrecen de la distribución de musgos, hepáticas, líquenes y helechos en una amplia región antártica. Se han comparado los valores de *P*, que mide la aleatoriedad del ajuste entre teoría y realidad. A menor valor de *P*, mayor significación estadística y, por tanto, mayor verosimilitud.



DISPERSION EOLICA: La semejanza florística depende de los patrones de flujo de vientos.



VICARIANZA: Las floras de dos lugares se parecerán más cuanto más reciente sea la separación geológica entre éstos.



GEODESICA: La semejanza entre floras de dos lugares es función inversa de la distancia entre ellos.

	EOLICA	VICARIANZA	GEODESICA
MUSGOS	0,004	0,201	0,112
HEPATICAS	0,004	0,110	0,062
LIQUENES	0,003	0,367	0,260
HELECHOS	0,003	–	0,003

EL PODER DEL VIENTO

La hipótesis ganadora es la de dispersión eólica a larga distancia: presenta unos valores de ajuste notablemente significativos y siempre mayores que las hipótesis alternativas (*P* es menor que un 5 por mil, *naranja*). La hipótesis de la vicarianza no explica la semejanza florística en ningún caso. (No ha podido evaluarse en los helechos al no poder incluir datos en las zonas antárticas y un número elevado de islas subantárticas.) La hipótesis geodésica ofrece un buen ajuste sólo en el caso de los helechos.

ANGEL M. FELICISIMO Y JESUS MUÑOZ

La hipótesis de la vicarianza no logró explicar la semejanza de los tres primeros grupos taxonómicos estudiados. No pudimos incluir los helechos en este análisis por una razón: el número de localidades que pertenecieron a Gondwana y donde este grupo se halla presente ahora es muy restringido. (El clima impide el desarrollo de helechos en la Antártida y en las islas subantárticas.) Al no poder incluir tales localidades en los análisis, el tamaño de la muestra se reducía excesivamente. Insistiremos aquí en que una parte de las islas es de origen volcánico y reciente, por lo que la vicarianza nunca podría explicar la presencia actual de las especies; las islas en cuestión nunca formaron parte de Gondwana.

La hipótesis geodésica, basada en la distancia actual, se ajustó bien sólo en el caso de los helechos. En el resto, la significación estadística fue siempre mucho menor que la correspondiente a la dispersión eólica.

En resumen, el estudio respalda la hipótesis de la dispersión eólica a larga distancia como factor determinante de la semejanza florística en los grupos analizados. Asimismo, se muestra que la vicarianza no constituye un mecanismo explicativo de la presencia o ausencia de las especies actuales, aunque tal vez sí pueda aplicarse a niveles taxonómicos superiores.

¿Podemos extrapolar esos resultados a la totalidad de la flora y fauna? Obviamente, no. La dispersión pasiva por el viento opera sólo en organismos livianos y que no son transportados por voladores activos (como los parásitos de aves). Sin embargo, el viento puede seguir siendo un factor determinante en la dispersión de grupos animales y vegetales como insectos diminutos, algas de agua dulce y hongos, entre otros.

En consecuencia, nuestro trabajo seguirá en un futuro dos líneas complementarias. Primero, realizaremos el mismo análisis con nuevos grupos taxonómicos, de flora y de fauna. Y en segundo lugar, mediremos la distancia genética entre distintas poblaciones de especies presentes en muchas de las localidades analizadas. Comprobaremos entonces si las distancias genéticas guardan relación con la conectividad por vientos o con la distancia geográfica.

Bibliografía complementaria

SCATTEROMETRY. A. C. M. Stoffelen en *Electronic Theses and Dissertations*. Utrecht University, 1998. <http://www.library.uu.nl/digiarchief/dip/diss/01840669/inhoud.htm>

DISPERSAL ECOLOGY. J. M. Bullock, R. E. Kenward y R. S. Hails. Blackwell Publishing; Oxford, 2002.

Página sobre la misión QuikScat de la NASA-Laboratorio de Propulsión a Chorro <http://winds.jpl.nasa.gov>

Revisión del Sistema Internacional de Unidades

En el Sistema Internacional de Unidades del futuro, también unidades como el kilogramo o el ampère se definirán a partir de las constantes de la naturaleza

Robert Wynands y Ernst O. Göbel

CONCEPTOS BASICOS

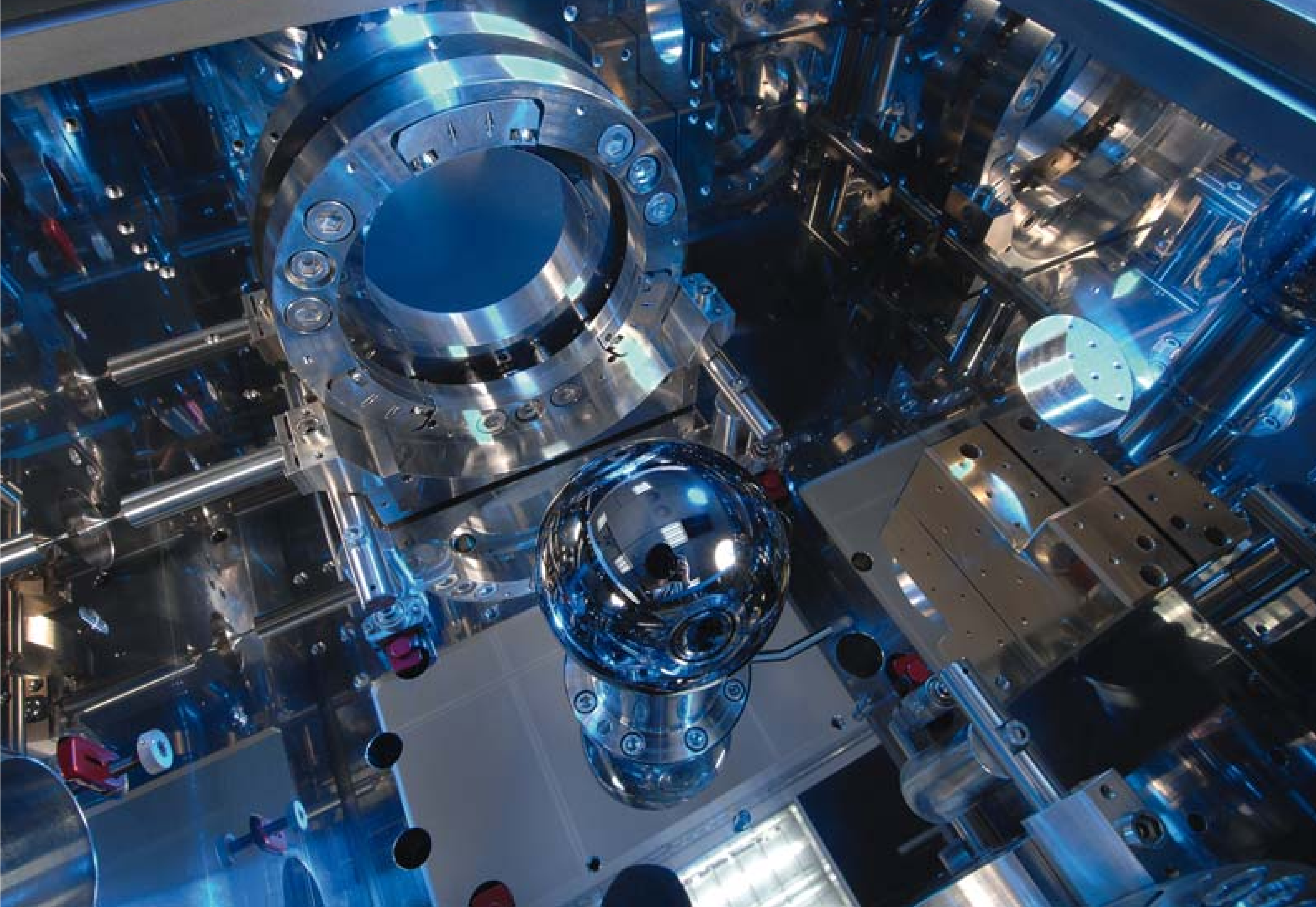
- La mayoría de las unidades del Sistema Internacional aún se definen en función de patrones estándar. El kilogramo, por ejemplo, se fija igual a la masa de cierto cilindro de platino e iridio custodiado en Sèvres.
- La metrología moderna busca unidades definidas a partir de las constantes de la naturaleza. La idea consiste en decidir un valor exacto para las constantes naturales y derivar, a partir de ellas, el de las unidades de medida.
- Hasta ahora, esto sólo se ha conseguido con el metro y el segundo. El metro se define como la distancia recorrida por la luz en exactamente 1/299.792.458 segundos. En el futuro se espera poder alcanzar la precisión experimental necesaria para establecer, de modo análogo, el resto de las unidades.

Si bien juristas y políticos aún debaten sobre una mayor cohesión entre los estados de la Unión Europea, en lo referente a pesas y medidas, la unidad de Europa se alcanzó hace largo tiempo. En 1875, diecisiete estados de todo el mundo acordaron un conjunto común de unidades en la Convención Internacional de Pesas y Medidas, también conocida como la "Convención del Metro". Con ello se hacía realidad el sueño de los revolucionarios franceses, quienes, ya unos ochenta años antes, habían aspirado a un sistema independiente de toda circunstancia local y que sustituyese a las unidades de medida de la época (como la vara o la pulgada, derivadas con frecuencia de la longitud del antebrazo o la anchura del pulgar del soberano respectivo). Sólo en los territorios alemanes había docenas de varas, cuya longitud variaba desde los 40,38 centímetros en Erfurt hasta los 79,90 centímetros en Múnich. La unificación no solamente tenía razones ideológicas: la diversidad de estándares dificultaba el comercio libre y frenaba el desarrollo económico.

Hoy en día damos por supuestas unidades como el metro, el kilogramo o el grado Celsius, válidas en casi todo el mundo. Una excepción la constituye EE.UU., donde aún hoy se emplean la milla, la onza y el grado Fahrenheit, un hecho más que notable si se tiene en cuenta que EE.UU. fue, desde el principio, miembro de la Convención del Metro. También en Europa son habituales los datos en pulgadas para discos duros de ordenadores o pantallas de televisión, si bien tales etiquetas han de entenderse más como denominación de una clase que como unidades de medida.

Como su propio nombre indica, las unidades de medida sirven para medir y, por tanto, para comparar objetos. Para comprobar si el ancho de esta página mide 210 milímetros, su tamaño puede cotejarse con la cantidad de líneas de un milímetro que figuran en una regla. Las fracciones de segundo que, en el deporte de alta competición, distinguen entre vencedor y perdedor se determinan a partir de las marcas de tiempo de un cronómetro. Se trate de lo que se trate, para medir algo siempre hay que contar cuántas veces el estándar de una magnitud cabe en el intervalo en cuestión. Una consecuencia es que la precisión del resultado no puede ser mayor que la del estándar con que se compare. En el día a día, para determinar si una hoja de papel satisface las exigencias de la norma DIN, basta la regla antes mencionada. Ahora bien, la comprobación del paso de rosca de un tornillo ya implica estándares más finos, y aún mucho mayor es la precisión requerida para la elaboración de transistores, con tamaños de milésimas o incluso millonésimas de milímetro.

Posiblemente, el estándar más conocido sea el prototipo internacional del kilogramo, o "kilogramo patrón" (*véase la figura 2*): un cilindro de una aleación de platino e iridio que, por definición, cuenta con un kilogramo de masa. Desde el año 1889 se guarda en una caja fuerte de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIMP, por sus siglas en francés) en Sèvres, cerca de París. En su momento, reemplazó a la antigua definición de kilogramo, basada en la masa de un litro de agua de máxima densidad. Ello supuso un avance, ya que la definición anterior exigía determinar la temperatura y



1. UN MONOCRISTAL PULIDO DE SILICIO, de esfericidad casi perfecta y con una elevada pureza isotópica, debería ayudar a redefinir el kilogramo. La alta precisión de su geometría permite determinar, con una precisión sin precedentes, el número de átomos contenidos en un mol de sustancia (el número de Avogadro). Esta constante natural serviría de base para una nueva definición del kilogramo.

presión del agua, cuya medición requería, a su vez, recurrir a una unidad de masa. Con el kilogramo patrón y la distribución de réplicas a los miembros de la Convención del Metro se instauró un estándar independiente de otras magnitudes, lugar o tiempo.

Una vez al año, en solemne ceremonia, se comprueba si el cilindro permanece todavía intacto y en su sitio. En 1950 y 1990 se compararon las réplicas con el prototipo. El resultado: la mayoría de las copias pesaban unos 50 microgramos más que el original. Probablemente, el paso del tiempo o la limpieza rutinaria provocasen el "adelgazamiento" del prototipo... y con él, en sentido estricto, ¡también el del kilogramo!

Aunque tan minúscula diferencia acarrea pocas implicaciones para la vida cotidiana (un panadero difícilmente podría llegar a pesarla), para la ciencia el panorama es distinto, ya que el kilogramo interviene en la definición de otras unidades, como la de tensión eléctrica o intensidad de campo magnético. En rigor, los valores numéricos en las fórmulas físicas deberían adaptarse a la pérdida de masa del kilogramo patrón. Algo carente de sentido.

Semejantes problemas de pérdida, deterioro o envejecimiento son inherentes a cualquier estándar basado en artefactos, ya sean naturales (así, la anterior definición de kilogramo como la masa de un litro de agua) o artificiales. Por ello, hace ya más de cien años que el físico escocés James Clerk Maxwell (1831-1879) propuso determinar las unidades de medida a partir de propiedades invariables de átomos o moléculas.

En lo que respecta a la unidad de tiempo, el segundo, eso ya ha ocurrido. Hasta mediados del siglo XX aún se determinaba según la duración del día; esto es, a partir de la rotación de la Tierra sobre su propio eje. Más adelante pasó a definirse en función de la duración del año, dada por el giro de la Tierra alrededor del Sol. Pero nuestro planeta tampoco permite definir un estándar invariable de tiempo, ya que su rotación queda sujeta a fluctuaciones imprevistas, como las ocasionadas por los terremotos. Además, va frenándose poco a poco debido a la fricción de las mareas, lo que aproximadamente cada dos años hace necesaria la inclusión de un "segundo bisiesto".

Cuando se hizo técnicamente posible, la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) acordó, en 1967, establecer la unidad de tiempo a partir de una determinada transición de los átomos de cesio. Así, un segundo

EL SISTEMA ACTUAL DE UNIDADES

■ El **segundo** coincide con 9.192.631.770 veces el período de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles de la estructura hiperfina del estado fundamental de los átomos de cesio ^{133}Cs.

■ El **metro** es la distancia recorrida por la luz en el vacío en un intervalo de 1/299.792.458 segundos.

■ El **kilogramo** se define como la masa del prototipo internacional del kilogramo, un cilindro de platino e iridio guardado en la Oficina Internacional de Pesas y Medidas, en Sèvres, cerca de París.

■ El **ampère** se define como la intensidad de una corriente constante que, al circular por dos hilos conductores paralelos, rectilíneos, infinitamente largos, con una sección transversal circular despreciable y separados por una distancia de un metro en el vacío, ejerce una fuerza entre los hilos de $2 \cdot 10^{-7}$ newton por metro de longitud de los mismos.

■ El **kelvin**, la unidad de temperatura termodinámica, viene dado por 1/273,16 veces la temperatura termodinámica del punto triple del agua.

■ El **mol** es la cantidad de sustancia de un sistema que contenga tantos componentes como átomos hay en 0,012 kilogramos de nucleidos de ^{12}C. Al emplear el mol siempre hay que especificar sus componentes; éstos pueden ser átomos, moléculas, iones, electrones u otras partículas o grupos de partículas, siempre y cuando su naturaleza quede perfectamente determinada.

■ La **candela** se define como la intensidad de la luz emitida, en una dirección específica, por una fuente de luz monocromática de frecuencia igual a $540 \cdot 10^{12}$ hertz y cuya intensidad de radiación a lo largo de la dirección escogida es de 1/683 watt por unidad de ángulo sólido (estereorradián).

corresponde a la duración de 9.192.631.770 oscilaciones de la radiación emitida en dicha transición. Al principio, la precisión llegaba a unas 9 cifras decimales. Hoy en día, los mejores relojes del mundo (los relojes atómicos de cesio) alcanzan una precisión que supera las 15 cifras decimales (*véase la figura 4*). De ello no se benefician sólo los científicos: sin indicadores temporales tan exactos no sería posible sincronizar la transmisión de paquetes de datos en las redes de comunicaciones, ni tampoco determinar la posición mediante la navegación por satélite. Es probable que, dentro de pocos años, otro elemento químico supere al cesio: un elemento al que no se hará vibrar con microondas, sino con luz láser. Un "reloj óptico atómico" sería hasta cien veces más preciso gracias a la altísima frecuencia de la luz visible [*véase* "Reglas de luz", por S. Cundiff, J. Ye y J. Hall; Investigación y Ciencia, junio de 2008].

La unidad de longitud, el metro, también ha sido adecuada a los avances técnicos. En el pasado, una barra de platino e iridio, con una sección transversal específica y una longitud derivada de la circunferencia de la Tierra, sirvió como "metro patrón". En 1960 fue reemplazado por un múltiplo determinado de la longitud de onda de cierta radiación emitida por los átomos de criptón. Si bien con ello se había introducido un estándar atómico, poco después el mismo dejaría de estar a la altura de las exigencias de la ciencia y la técnica. Eso se hizo patente en los años setenta del siglo pasado, cuando la precisión en las medidas de la velocidad de la luz quedó determinada (y limitada) por la exactitud con que podía reducirse la distancia de referencia a la definición del metro.

Sería por ello que, en 1983, se invirtieron los roles de ambas cantidades: se asignó a la luz una velocidad en el vacío de 299.792.458 metros por segundo. De esta manera, el metro quedaba definido como la distancia recorrida por la luz en el vacío durante 1/299.792.458 segundos.

Actuación urgente

El Sistema Internacional de Unidades (SI) de hoy día se fraguó en las sesiones de la CGPM desde 1954 (*véase el recuadro* "El sistema actual de unidades"). Oficialmente bautizado con este nombre en 1960, ha sido adaptado varias veces (como en 1967, cuando se acordó la redefinición del segundo a partir de propiedades atómicas). La técnica ha evolucionado tremendamente desde entonces. Tanto es así, que hoy en día son las incertidumbres en la representación de varias unidades de medida las que limitan la precisión en un gran número de experimentos. De ahí que aún siga pendiente una renovación del SI. En un futuro próximo, deben redefinirse en función de constantes naturales otras unidades, muy particularmente el kilogramo, el mol (la unidad de la cantidad de sustancia), el kelvin (temperatura termodinámica o absoluta, la que se mide respecto del cero absoluto), el ampère (intensidad de corriente) y, posiblemente, también la candela (la unidad de medida de la intensidad de la luz). Tal y como se hizo en el caso del metro, se intentará determinar las constantes adecuadas con tanta precisión como permita el SI actual, para después fijar de una vez para siempre estos valores y, finalmente, derivar a partir de ellos las nuevas definiciones.

La mayor urgencia la reviste el kilogramo. Al respecto, los metrólogos han acordado dos procedimientos prometedores: la nueva determinación y posterior definición del número de Avogadro N_A, o bien del cuanto de acción de Planck h [*véase* "Un nuevo kilogramo", por Ian Robinson; Investigación y Ciencia, febrero de 2007].

El primer planteamiento define el kilogramo a partir de la masa de un número exacto de átomos del mismo tipo. La creación de un "kilogramo patrón 2.0" requiere sumo control. Dado que la masa de un átomo es del orden de 10^{25} veces menor que la de un kilogramo, la tarea exige el recuento de un número correspondiente de átomos. En realidad, se intentó exactamente eso: depositar sobre un sustrato una cantidad ponderable de átomos (de bismuto, en este caso) procedentes de un haz de iones. Esta línea de trabajo ha sido abandonada, pues hubieran sido necesarios varios años de ardua investigación hasta averiguar si podría alcanzarse la cota de precisión exigida (10^{-8}, una parte en 100 millones).

No obstante, existe un procedimiento alternativo. Una analogía simple nos permitirá visualizarlo con facilidad. Supongamos que hemos de contar las botellas de bebida contenidas en un camión. Una manera de hacerlo consiste en vaciar el vehículo y contar cada una de las botellas en cada caja. Pero si las cajas se hallan perfectamente ordenadas en el interior del camión, dispondremos de una alternativa menos costosa: determinar el volumen del espacio de carga, dividirlo por el volumen de una sola caja y multiplicar el resultado por el número de botellas por caja. Ahora bien, tal cálculo será correcto sólo si el interior del camión se halla completamente lleno con cajas dispuestas en perfecto orden y si, además, en ninguna caja faltan o sobran botellas ni hay escondidas botellas de otra clase.

Un consorcio internacional bajo la dirección del Instituto Federal Físico Técnico de Alema-

nia (PTB, por sus siglas en alemán) sigue este procedimiento. El papel del espacio de carga lo desempeña un monocristal de silicio ^{28}Si de elevada pureza isotópica. La elección del silicio obedece a la dilatada experiencia con la que, gracias a la industria de semiconductores, cuenta la producción de cristales prácticamente sin impurezas ni defectos cristalinos. El cristal toma la forma de una esfera de unos 9,4 centímetros de diámetro, cuya superficie ha sido cuidadosamente pulida para obtener una geometría lo más perfecta posible (*véase la figura 1*). El tamaño escogido es tal que la masa de la esfera es muy próxima a la del kilogramo patrón, para así facilitar una comparación precisa entre ambos. El volumen del cristal se determina, con suma exactitud, mediante un interferómetro óptico expresamente desarrollado; medir este volumen cristalino corresponde, en la analogía del camión, a evaluar el volumen del espacio de carga.

En la red cristalina los átomos están ordenados regularmente. La difracción de rayos X revela la distancia entre los átomos de la red, análoga al tamaño de las cajas de botellas. Para contrastar el resultado se determina también la densidad del material, a fin de comprobar si existen cavidades o irregularidades. Además, mediante un espectrómetro de masas se evalúa, con finísima precisión, la masa atómica relativa de un átomo de silicio (con respecto a la definición vigente de kilogramo). Por último, hay que averiguar el grosor de la inevitable capa de óxido que se forma sobre la superficie de la esfera y corregir sus efectos en el resultado final (el óxido y el silicio presentan densidades diferentes).

Ya disponemos de todos los elementos necesarios para relacionar la masa de 1 kilogramo (magnitud macroscópica) con una escala microscópica de masas, la masa atómica del isótopo ^{28}Si (según el convenio habitual, relativa a la de los átomos del isótopo ^{12}C del carbono):

$$M_{\text{esfera}} = \frac{1}{N_A} \frac{V_{\text{esfera}}}{a^3} n \, m_{\text{Si}}$$

Aquí n representa el número de átomos en una celda cúbica elemental de arista a (en nuestra analogía, el número de botellas por caja) y m_{Si} la masa molar del ^{28}Si, en torno a 28 gramos. La constante de proporcionalidad es el número de Avogadro N_A, así denominado en honor del físico y químico italiano Amedeo Avogadro (1776-1856). Dicha constante indica el número de partículas presentes en una cantidad de sustancia igual a 1 mol (*véase el recuadro* "El sistema actual de unidades"). Al despejar N_A de la ecuación de arriba, el kilogramo queda definido como la masa de un número determinado de átomos.

En principio, la nueva definición podría basarse en el isótopo ^{28}Si del silicio. No obstante, la escala de masas tradicional refiere siempre a la masa del isótopo ^{12}C del carbono. Este convenio está tan firmemente establecido que cualquier cambio requeriría un enorme esfuerzo. Por ello, otra posible redefinición establecería el kilogramo como la masa de 5,0184515XX $\cdot 10^{25}$ átomos de ^{12}C en reposo y en el estado fundamental. Aquí hacemos constar el valor más preciso disponible del número de Avogadro dividido por la masa de un mol de partículas ^{12}C (12 gramos). Los caracteres "XX" indican que las últimas cifras aún han de ser acordadas con exactitud.

No obstante, la esfera de silicio no sustituirá al kilogramo patrón. En principio, sólo había

Sin indicaciones temporales de suma precisión no sería posible sincronizar la transmisión de datos en las redes de comunicaciones



2. EL KILOGRAMO PATRON, un cilindro de platino e iridio, se guarda en una caja fuerte en la Oficina Internacional de Pesas y Medidas, en Sèvres, cerca de París. Su masa es muy aproximada a la de un litro de agua sujeta a condiciones ambientales específicas.



3. LA "VARA DE BRAUNSCHWEIG" fue empotrada en la pared del ayuntamiento histórico con el objetivo de que los comerciantes pudiesen regirse por ella. Quien no lo hiciera había de someterse a severas sanciones. (Inscripción: "Vara de Braunschweig, 57,07 cm. Medida de longitud prescrita para transacciones mercantiles desde el siglo XVI.")

En el futuro, el kilogramo podría definirse como la masa de 5,0184515XX · 10[25] átomos de [12]C en su estado fundamental

sido fabricada para determinar el número de Avogadro. Para evitar inconsistencias, debería adaptarse la definición actual del mol: el mol, la unidad de cantidad de sustancia de una clase específica de partículas, quedaría determinado de tal manera que el número de Avogadro tomase el valor de $N_A = 6{,}02214179XX \cdot 10^{23}$ partículas por mol.

Determinación del kilogramo mediante efectos cuánticos

Un método alternativo emplea la balanza de Watt con el objeto de establecer una relación entre el kilogramo y otra constante natural, el cuanto de acción de Planck h. El peso de un objeto sobre el platillo de la balanza resulta compensado por una fuerza magnética. Esta tiene su origen en la interacción entre un campo magnético estático espacialmente inhomogéneo y el campo generado por una bobina, a través de la cual circula una corriente y que se halla unida al platillo de la balanza. La masa del objeto se deriva a partir de la intensidad de la corriente I_1 necesaria para que se produzca dicha compensación, siempre y cuando la aceleración local de la gravedad y las inhomogeneidades del campo magnético se conozcan con precisión. Para determinar estas últimas con la exactitud requerida, en un experimento auxiliar se desplaza la bobina con velocidad constante a través del campo. Esto modifica el flujo magnético a través de la bobina, con lo que se induce una tensión eléctrica U_2, la cual proporciona una medida de la inhomogeneidad del campo, cuyo efecto logra entonces caracterizarse con exactitud.

Según la ley de Ohm, la intensidad I_1 se corresponde con el cociente de una tensión y una resistencia eléctrica: $I_1 = U_1/R_1$. Hoy en día, las tensiones eléctricas como U_1 y U_2 logran determinarse con una precisión muy fina gracias a los efectos cuánticos en las uniones Josephson, que consisten en dos elementos superconductores separados por una capa fina y de conducción eléctrica normal. Al irradiar el conjunto con microondas de frecuencia f_J se induce una corriente que genera una tensión entre los extremos de la unión Josephson; dicha tensión viene dada por $U_n = n(h/2e)f_J$, donde n es un número entero y e la carga del electrón. La constante $K_J = 2e/h$ fue bautizada en honor del físico británico Brian Josephson, quien ya en sus estudios de doctorado, a la edad de 23 años, avanzó aspectos importantes sobre este tipo de contactos. Sus investigaciones al respecto le valdrían el premio Nobel en 1973.

Por su parte, para la medición de resistencias con una precisión comparable se recurre al efecto Hall cuántico. En 1985, su descubrimiento por parte del físico Klaus von Klitzing también sería recompensado con el premio Nobel. Dicho fenómeno se manifiesta cuando se hace circular una corriente a través de capas muy finas de semiconductores, al tiempo que se aplica un campo magnético intenso [*véase* "El efecto Hall cuántico", por Klaus von Klitzing; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1986]. Bajo tales condiciones se induce una tensión eléctrica a lo largo de la dirección perpendicular a la de la corriente. El cociente de dicha tensión con la intensidad de la corriente se denomina resistencia Hall, la cual queda limitada a unos pocos valores cuantizados: $R_H = h/(me^2)$, donde m es un número entero. En esta fórmula aparecen las constantes naturales h y e en la combinación $R_K = h/e^2$, denominada constante de von Klitzing.

Volvamos a la balanza de Watt. Si se miden las magnitudes U_1, U_2 y R_1 empleando para ello los efectos cuánticos mencionados, tras una serie de transformaciones matemáticas se obtiene una ecuación que relaciona el cuanto de acción de Planck h con la masa de prueba y con la aceleración de la gravedad en el lugar de la medición. Ello permite invertir las tornas y definir la unidad del SI de una manera un tanto peculiar: en el futuro, un kilogramo se definirá como la masa que otorga al cuanto de acción de Planck el valor de $h = 6{,}62606896XX \cdot 10^{-34}$ joule × segundo.

La dificultad de ambas estrategias radica en reducir las perturbaciones experimentales hasta

alcanzar una precisión de 10^{-8}, que es la que se conseguía hasta ahora al relacionar masas con el kilogramo patrón. Esto no se ha logrado todavía ni con el experimento basado en el número de Avogadro ni con ninguna de las cinco balanzas de Watt en construcción o en funcionamiento. Peor aún: ambos métodos arrojan resultados inconsistentes. Actualmente se están investigando las causas mediante análisis cuidadosos de los dispositivos, con la esperanza de detectar posibles fuentes de error. La Convención del Metro se ha decidido por el método que pasa por definir el cuanto de acción de Planck, si bien para ello un prerrequisito es limar las diferencias entre ambos experimentos.

Definición del grado kelvin

Otra definición problemática la constituye la del grado Kelvin (K) como unidad de temperatura termodinámica. Para ello se emplea agua purísima: a 273,16 kelvin, el agua alcanza su "punto triple", un estado termodinámico en el que se hace posible el equilibrio entre las fases gaseosa, líquida y sólida. Dado que la composición isotópica y la presencia de las más ínfimas impurezas influyen en la localización de dicho punto, existe una prescripción precisa sobre cómo obtener una muestra de agua adecuada para la observación del punto triple. Debido a que cada océano exhibe una composición isotópica característica, dicha prescripción establece una mezcla muy precisa de aguas provenientes de todos los océanos del mundo. El problema radica en que, de nuevo, se asigna a un artefacto la calidad de estándar.

También aquí habría de recurrirse a una constante de la naturaleza. En este caso, la apropiada resulta ser la constante de Boltzmann k_B, la cual relaciona la temperatura T con la energía térmica de un sistema: $E_T = k_B T$, donde $T = 0$ corresponde al cero absoluto. Siempre y cuando se pudiese determinar esa constante con una precisión de seis cifras, el kelvin podría definirse (sin pérdida de exactitud con respecto al estándar actual) de la siguiente manera: una variación de temperatura de 1 K se corresponde con un cambio en la energía térmica de $1{,}3806504\text{XX} \cdot 10^{-23}$ joule. Ello relacionaría las mediciones de temperatura con las de energía.

No obstante, se ha optado por una definición alternativa, si bien físicamente equivalente: se define el kelvin de manera que la constante de Boltzmann ascienda exactamente a $k_B = 1{,}3806504\text{XX} \cdot 10^{-23}$ joule/kelvin. Con ello, la definición del kelvin se torna independiente de cualquier realización experimental concreta.

También en este caso se realizan experimentos en todo el mundo para llegar, por vías diferentes, a esa nueva determinación. En el PTB se emplean la constante dieléctrica y experimentos de termometría de gases. Esta constante, también llamada permitividad, describe la permeabilidad de un material a los campos eléctricos. Si se coloca un material en el campo eléctrico existente entre las dos placas de un condensador, la constante dieléctrica del material influye sobre la capacidad del condensador (la cantidad de carga eléctrica que éste puede almacenar). Para una geometría dada de las placas del condensador, es posible calcular la permitividad del material interpuesto a partir de una medida de la capacidad.

En el caso de un gas, la permitividad depende de la temperatura. En el experimento del PTB, un condensador de precisión se llena con helio. La capacidad del condensador es función de la temperatura y de la cantidad de gas, que, a su vez, se relaciona directamente con la presión del gas en el volumen fijo del contenedor. Un análisis preciso de las condiciones bajo las que se realiza el experimento permite determinar la magnitud de la constante de Boltzmann a partir de las diferentes presiones y temperaturas.

Los autores

Robert Wynands y **Ernst O. Göbel** trabajan en el Instituto Federal Físico Técnico (PTB, el organismo nacional de metrología) de Alemania, en Braunschweig. Wynands comenzó a cargo de los relojes atómicos; actualmente es directivo. Göbel preside el PTB y la Convención Internacional del Metro.

SUGERENCIAS PARA UN SISTEMA DE UNIDADES MODERNO

Los comités de la Convención Internacional del Metro tienen por objetivo establecer las definiciones siguientes, basadas en constantes naturales y formuladas todas ellas de la misma manera. Las "X" indican que la cifra en cuestión aún ha de decidirse con exactitud. Además, la futura definición del segundo se basará en un átomo o ion diferente del cesio.

NOMBRE	LA UNIDAD DE...	SE DEFINE/DEFINIRA DE TAL MANERA QUE...
Segundo	tiempo	la frecuencia de transición entre los dos estados de la estructura hiperfina del estado fundamental del átomo ^{133}Cs sea 9.192.631.770 hertz.
Metro	longitud	la velocidad de la luz en el vacío sea 299.792.458 metros por segundo.
Kilogramo	masa	el cuanto de acción de Planck sea $6{,}62606896\text{XX} \cdot 10^{-34}$ joule × segundo.
Ampère	intensidad de corriente	la carga eléctrica del electrón sea $1{,}602176487\,\text{XX} \cdot 10^{-19}$ coulomb.
Kelvin	temperatura termodinámica	la constante de Boltzmann sea $1{,}3806504\text{XX} \cdot 10^{-23}$ joule/kelvin.
Mol	cantidad de sustancia	el número de Avogadro sea $6{,}02214179\text{XX} \cdot 10^{23}$ partículas/mol.
Candela	intensidad de la luz	la intensidad espectral de la radiación monocromática de $540 \cdot 10^{12}$ hertz sea 683 lumen/watt.



4. UNO DE LOS RELOJES ATOMICOS MAS MODERNOS DEL MUNDO es el reloj atómico de cesio CSF2 del Instituto Federal Físico Técnico de Alemania. En su interior se iluminan átomos de cesio con un láser para refrigerarlos hasta temperaturas muy próximas al cero absoluto. La irradiación con microondas de la frecuencia exacta estimula una determinada transición en los átomos, que se emplea para determinar la duración de un segundo. Cerca de una docena de estos relojes repartidos por todo el mundo asegura la exactitud de la escala internacional de tiempo.

Contar electrones 100 millones de veces

La definición del ampère, la unidad de intensidad de corriente eléctrica, tampoco resulta satisfactoria hoy en día. Estrictamente hablando, confeccionar una “regla de ampère” es imposible, ya que para ello se necesitarían dos hilos metálicos rectos y de longitud infinita (*véase el recuadro* “El sistema actual de unidades”). En su lugar se emplean configuraciones de hilos enrollados y se calculan las correcciones que se derivan de esa geometría. Los instrumentos que determinan el ampère a partir de la ley de Ohm (es decir, como el cociente entre un volt de tensión y un ohm de resistencia) son un orden de magnitud más exactos. También aquí, la tensión y la resistencia se miden mediante el efecto Josephson y el efecto Hall cuántico.

No obstante, dado que la corriente eléctrica se corresponde con la cantidad de carga eléctrica transportada por unidad de tiempo, es posible basar una nueva definición en el valor de la carga del electrón. Así, el ampère quedaría definido de tal manera que el valor de la carga del electrón viniese dado por $e = 1{,}602176487XX \cdot 10^{-19}$ coulomb.

Para la medición directa se necesitan componentes electrónicos que dejen pasar un único electrón a la vez, a modo de puerta giratoria que impidiese la entrada de más de una persona al mismo tiempo. Si tales componentes se sincronizan con una tensión periódica de control, con cada pulso pasará exactamente un electrón. La frecuencia de los pulsos puede determinarse con precisión haciendo uso de un reloj atómico. Así, la corriente que pasa por el componente electrónico resulta de aplicar al pie de la letra la nueva definición; esto es, dividiendo el valor de la carga de un electrón ($1{,}602176487XX \cdot 10^{-19}$ coulomb) por la duración de un solo pulso.

Todo ello suena mucho más fácil de lo que en realidad es. El problema radica en que, para que el método funcione, en ningún caso pueden pasar dos electrones a la vez, ni tampoco puede darse la circunstancia de que, casualmente, no pase ninguno. El nivel de exigencia es enorme: en cada 100 millones de pulsos podemos permitirnos sólo una equivocación. Los investigadores aún se afanan en la consecución de “puertas” para un único electrón que resulten completamente fiables. Para ello, sobre una pastilla semiconductora o en un circuito superconductor se introduce una “isla” diminuta, de tamaño inferior al micrómetro, en la cual sólo puede ser depositado un electrón adicional, que puede ser posteriormente conducido hacia el otro lado.

Tales estructuras no son sólo difíciles de fabricar y reproducir; bastan débiles perturbaciones eléctricas para degradarlas. Además, las intensidades de corriente son demasiado exiguas para una técnica de medición viable. Los investigadores intentan superar el problema mediante el aumento de la frecuencia del pulso, la conexión en paralelo de varias de estas fuentes o el uso de comparadores criogénicos de corriente, una clase especial de transformadores que aumentan la intensidad de la corriente.

Por su parte, los expertos que persiguen una nueva definición de candela no se hallan aún sino en los inicios del proceso. Por lo menos, en este caso el sistema de unidades actual refiere la unidad para la intensidad de la luz a cierta radiación monocromática: la de $540 \cdot 10^{12}$ hertz (correspondiente a una longitud de onda de 555 nanómetros; es decir, luz verde). Para una fuente que emite en dicha longitud de onda, la intensidad luminosa (en una dirección dada) es igual a 1 candela cuando la intensidad de la radiación asciende a 1/683 watt en un ángulo sólido de un estereorradián. Lo retorcido de estas cantidades se explica por la historia de esta unidad: la candela de hoy ha de coincidir con la establecida antaño mediante los estándares de llama o de metales candentes.

En cualquier caso, se trata ésta de una unidad que puede derivarse a partir del segundo, el metro y el kilogramo. A pesar de todo, se indaga en una definición independiente debido a su gran importancia económica, ya que la candela opera como unidad de referencia en la industria de la iluminación. A fin de poder relacionarla con magnitudes cuánticas fundamentales, se emplean nuevas fuentes de luz que emiten fotones individuales y cuya energía se mide con finísima precisión. Dichos fotones se recogen con detectores capacitados para detectar fotones aislados, lo que permite relacionar la potencia de la emisión microscópica con la de la radiación macroscópica. No obstante, dada la minúscula energía de un fotón, al igual que en el caso del ampère, también aquí resulta problemático obtener resultados precisos.

La estructura jerárquica de la Convención del Metro sólo autoriza a la Conferencia General de Pesas y Medidas, reunida una vez cada cuatro años, para acordar una modificación del SI. La próxima conferencia tendrá lugar en 2011, por lo que los trabajos de investigación anteriormente citados tienen esta fecha presente. Tras las nuevas definiciones, ya sea en 2011 o con posterioridad, los valores numéricos de las constantes h, N_A, k_B y e quedarán fijados. Cualquier intento de volver a determinarlas experimentalmente conduciría a un círculo vicioso. En cualquier caso, más importante que una obtención precipitada de nuevas definiciones es una consistencia duradera del sistema de unidades, tanto en lo que respecta a la ausencia de contradicciones internas como a la necesidad de evitar saltos en las escalas. Así, el nuevo ampère debe tener la misma magnitud que el antiguo y un kilogramo de platino no debe contener de repente más masa que antes. Ni la ciencia ni la vida cotidiana pueden sufrir las consecuencias de una modificación en los valores de las unidades.

Naturalmente, la solución ha de ser duradera y exenta de cualquier necesidad de modificación futura. Por esta razón la nueva definición de segundo se hará esperar: no existe todavía consenso sobre qué transición atómica representará, a largo plazo, la mejor opción para reemplazar a la del cesio.

Las instituciones implicadas son conscientes de su responsabilidad. Si las investigaciones en metrología actualmente en curso no llegan a una conclusión satisfactoria antes de 2011, la Convención del Metro dará tiempo a los investigadores hasta el siguiente encuentro, en 2015. ¿Qué sería este pequeño retraso comparado con la perspectiva de establecer un sistema de medidas duradero y basado únicamente en las constantes de la naturaleza?

La candela de hoy debe referirse a la misma magnitud que antaño, cuando fue establecida mediante los estándares de llama o de metales candentes

Bibliografía complementaria

QUANTENNORMALE IM SI-EINHEITENSYSTEM. E. O. Göbel en *Physikalische Blätter*, n.º 53, págs. 217-223; 1997.

DAS INTERNATIONALE EINHEITENSYSTEM (SI). PTB-Mitteilungen; febrero de 2007. **www.ptb.de**

Campos magnéticos cósmicos

A pesar de que hace ya más de cien años de la primera detección de un campo magnético extraterrestre, la naturaleza parece tener aún más sorpresas que el hombre explicaciones. Es mucho lo que nos queda por aprender sobre estos viejos desconocidos

Klaus G. Strassmeier

CONCEPTOS BASICOS

- Los campos magnéticos llenan nuestro universo de múltiples maneras e influyen sobre numerosos fenómenos cósmicos. Sus dimensiones e intensidades comprenden varios órdenes de magnitud.
- El campo magnético del Sol, muy bien estudiado, sirve como modelo para entender los fenómenos magnéticos en estrellas de pequeña y gran masa.
- También las galaxias poseen un campo magnético, el cual puede influir de manera decisiva en su estructura y distribución de materia. Su origen y dinámica son objeto de investigación. En las galaxias espirales, el campo magnético más intenso es el generado entre los brazos de la galaxia mediante los "procesos de dinamo".

El electromagnetismo es una de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza. Sus propiedades fueron descubiertas por James Clerk Maxwell en la segunda mitad del siglo XIX. Las ecuaciones derivadas por el físico escocés establecen los principios de la electricidad y el magnetismo, que, con anterioridad a Maxwell, eran considerados fenómenos independientes. Entre otras propiedades, las ecuaciones de Maxwell describen la propagación de las ondas electromagnéticas, a las que pertenece la luz visible. Esta, al llegar a nuestros ojos, da lugar al estímulo que denominamos "visión".

Otra manifestación de esta fuerza fundamental corresponde a los campos magnéticos. Para éstos, sin embargo, carecemos de órgano sensorial, por lo que su detección exige el uso de aparatos de medida adecuados. Así, para orientarnos en el campo magnético terrestre requerimos una brújula. A pesar de ello hemos aprendido a utilizar los campos magnéticos en aplicaciones técnicas, ya se trate de un altavoz ordinario o de los imanes superconductores del acelerador de partículas LHC del CERN.

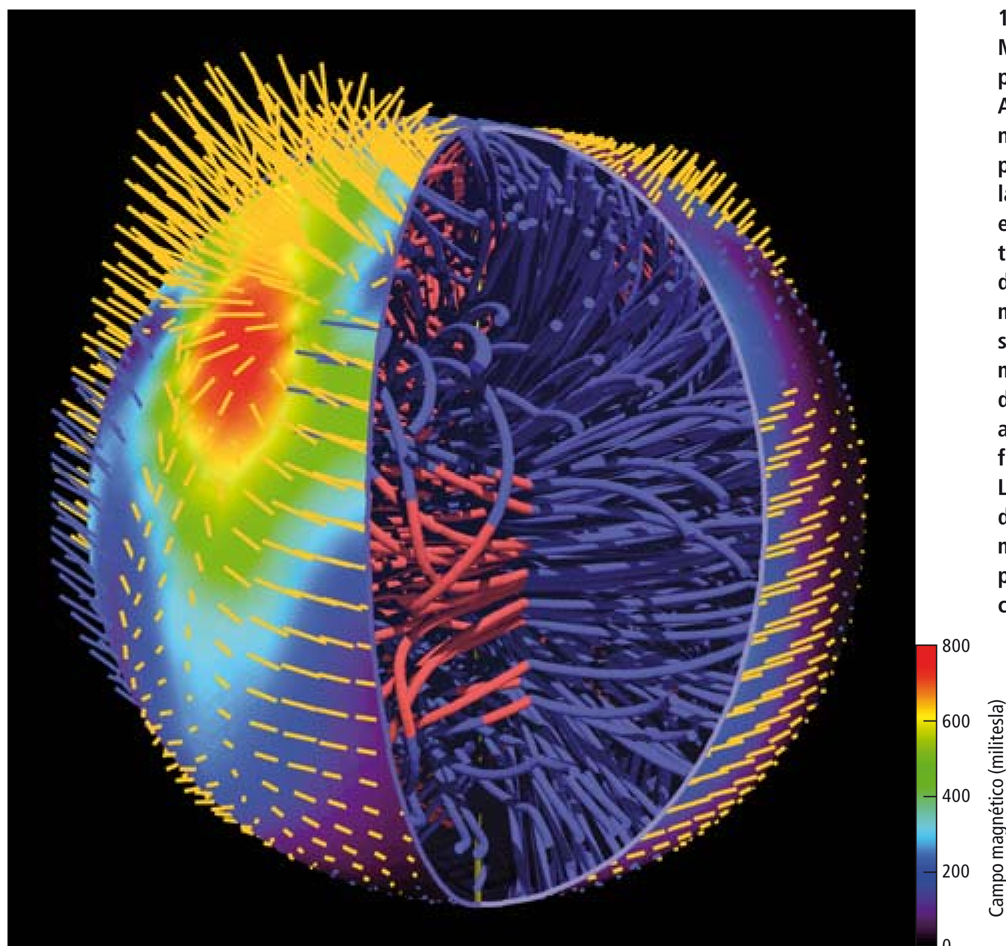
También en la naturaleza los campos magnéticos aceleran partículas. Es ésta la clave que nos permite entender la actividad solar y estelar y las corrientes de partículas asociadas. Las intensidades del campo magnético pueden ser muy diferentes: de manera directa o indirecta, han llegado a medirse valores comprendidos en un rango de 24 órdenes de magnitud.

Hace más de cien años que se descubrió el primer campo magnético fuera de la Tierra: en 1908, el astrónomo estadounidense George Ellery Hale detectó el campo magnético de las manchas solares. Con ello puso en marcha la investigación de los campos magnéticos cósmicos. Para describir los procesos dinámicos del cosmos de manera realista y detallada, necesitamos un entendimiento general sobre la interacción entre la materia y los campos magnéticos, que cubra todas las escalas de longitud, tiempo y densidad desde los comienzos del universo hasta el momento actual de formación de estrellas y planetas.

Su estudio no reviste un interés puramente académico. Los campos magnéticos afectan desde el primer momento a la aparición y desarrollo de la vida. El campo magnético terrestre protege a modo de pantalla la superficie de nuestro planeta, frente a la radiación cósmica de alta energía, gracias a lo cual logramos sobrevivir. Sin embargo, debido a la complejidad de los cálculos asociados, muy a menudo nos vemos obligados a ignorar los campos magnéticos en los modelos matemáticos del desarrollo de estrellas y galaxias.

Efectos sobre la luz

La detección y medición de los campos magnéticos cósmicos se basa en sus efectos sobre los mecanismos de emisión de luz. Los campos magnéticos rompen la degeneración de las configuraciones electrónicas de un átomo; al desdoblar los niveles de energía, posibilitan

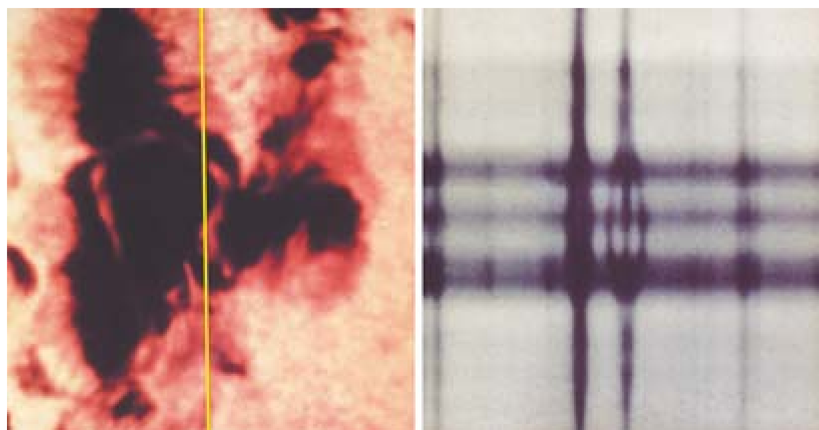


1. LA FORMACION DEL CAMPO MAGNETICO de una estrella se empieza a entender paulatinamente. A tal efecto se recurre a simulaciones numéricas llevadas a cabo por potentes ordenadores. Dado que las líneas espectrales se desdoblan en presencia de un campo magnético (efecto Zeeman), el espectro de la estrella II Pegasi ha permitido medir el campo magnético de su superficie. En la simulación que mostramos aquí, los tubos gruesos del interior de la estrella se acoplan al campo magnético de la superficie (*véase la escala de colores*). Las líneas amarillas muestran la dirección de las líneas del campo magnético local; su longitud es proporcional a la intensidad del campo en ese punto.

KLAUS STRASSMEIER, THORSTEN CARROLL Y RAINER ARLT (*arriba*); EBERHARD WIEHR, UNIVERSIDAD DE GÖTTINGEN (*abajo*)/*Sterne und Weltraum*

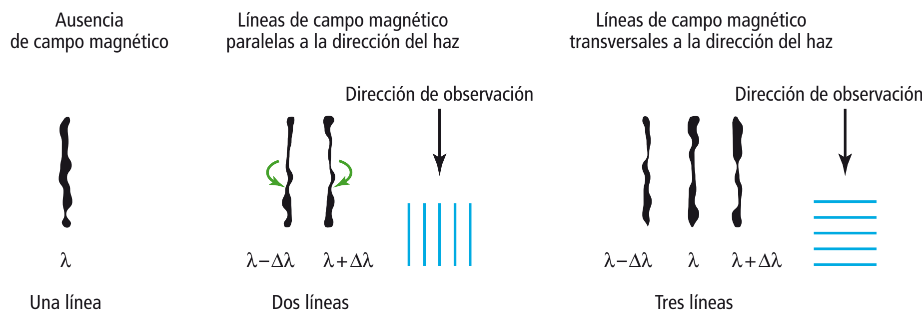
un mayor número de transiciones electrónicas (*véase la figura 3*). La luz emitida en cada una de estas transiciones posee distintos estados de polarización. La componente lineal ("componente π") procede de transiciones electrónicas entre niveles que poseen los mismos números cuánticos magnéticos; las componentes circulares ("componentes σ") provienen de transiciones entre niveles con números cuánticos magnéticos distintos. Estas componentes exhiben polarizaciones circulares opuestas ("derecha" e "izquierda") y sus longitudes de onda se hallan desplazadas, respectivamente, hacia el rojo o hacia el azul con respecto a la componente π. Este desplazamiento en la longitud de onda es proporcional al campo magnético en el que se encuentra el átomo, por lo que sirve para determinar su intensidad. El fenómeno fue descubierto en 1896 y 1897 por el físico holandés Pieter Zeeman (1865-1973), lo que en 1902 le valdría el premio Nobel de física.

En el caso más simple, las intensidades relativas de las tres componentes de una línea espectral tienen una dependencia sencilla con la orientación del campo magnético. A partir de las fórmulas que describen dicha dependencia, bautizadas en honor del físico americano Frederick H. Seares, se infiere la geometría del campo magnético.



2. CAMPO MAGNETICO EN LAS MANCHAS SOLARES. La rendija del espectrógrafo se alineó a lo largo de la franja amarilla vertical que se muestra en la imagen izquierda. En el espectro (*derecha*) se observa una línea espectral desdoblada en otras tres.

Desafortunadamente, la naturaleza no nos lo pone siempre tan fácil. Las ondas electromagnéticas deben atravesar el plasma que se interpone entre su lugar de origen y la Tierra. A lo largo del camino, el efecto Faraday induce una rotación del plano de polarización de la luz, lo que provoca complejas modificaciones



3. EN PRESENCIA DE UN CAMPO MAGNETICO los niveles de energía de un átomo o de una molécula se desdoblan en varios subniveles. Esto provoca la aparición de dos o incluso tres líneas espectrales en lugar de una.

en los coeficientes de absorción en la dirección de propagación. Este comportamiento se produce a través de las diferentes capas de una atmósfera estelar y también en el espacio interestelar. Ello explica por qué la interpretación de datos es tan difícil y por qué el magnetismo en el cosmos es aún una magnitud tan poco explorada.

Otro método empleado para la investigación de campos magnéticos lo constituyen las simulaciones por ordenador. No obstante, las mismas se enfrentan a un problema fundamental, que se resume en una única cantidad: el número de Reynolds, un coeficiente que aparece en las ecuaciones de magnetohidrodinámica (la disciplina que describe el comportamiento de gases conductores atravesados por campos magnéticos) y que refleja la relación entre la mayor y la menor de las escalas físicas relevantes en un plasma magnetizado. En el caso de la superficie solar, el número de Reynolds es del orden de 10^6. Esto implica que, en una simulación en la que la superficie solar quede modelizada por una red tridimensional de nodos equidistantes, son necesarios $(10^6)^3 = 10^{18}$ puntos de red. Esta potencia de cálculo es, desgraciadamente, diez mil millones de veces superior a la que hoy es técnicamente accesible.

Procesos de dinamo

Al igual que un gas, los campos magnéticos también ejercen una presión positiva; es decir, cuando no están encerrados, tienden a expandirse eternamente. Esta presión magnética es proporcional al cuadrado de la intensidad del campo. Para evitar su expansión se requiere un objeto eléctricamente conductor y ligado gravitacionalmente. Dicho objeto puede ser un planeta, una estrella, una galaxia o incluso el universo entero.

Cuando se desea confinar o deformar un campo magnético, éste reacciona con una fuerza recuperadora denominada tensión magnética. Cuando el objeto en el que el campo

GLOSARIO

Campo germen: Los mecanismos de dinamo (*véase la definición más abajo*) requieren la presencia de un campo magnético ya presente sobre el que poder actuar e incrementar su intensidad. Este "campo germen" debe haber sido creado en algún momento previo a la activación del mecanismo.

Campo toroidal: Es el campo magnético anular que un conductor rectilíneo genera en torno a su eje (el adjetivo "toroidal" remite a la forma geométrica de un anillo o una rosquilla, un "toro"). La Tierra, por el contrario, presenta un campo magnético poloidal, que toma la dirección del eje entre el Polo Norte y el Polo Sur.

Cuadrupolo: Las fuentes magnéticas más simples crean un campo magnético dipolar: una distribución con un "polo norte" y un "polo sur". Un cuadrupolo consiste en cierta superposición de dos dipolos. En general, un campo magnético complejo puede entenderse como la superposición de varias componentes multipolares.

Efecto Faraday: Cuando la luz polarizada atraviesa un medio en cuyo seno existe un campo magnético paralelo a la dirección de propagación de la luz, el plano de polarización experimenta un movimiento de rotación. El ángulo de rotación es proporcional a la longitud del camino recorrido por la luz y a la intensidad del campo magnético.

Efecto Hall: Cuando un medio conductor atravesado por una corriente eléctrica se halla en medio de un campo magnético estacionario, se genera en él una diferencia de potencial, la "tensión de Hall". La misma es perpendicular a la dirección de la corriente y a la del campo magnético en el seno del conductor.

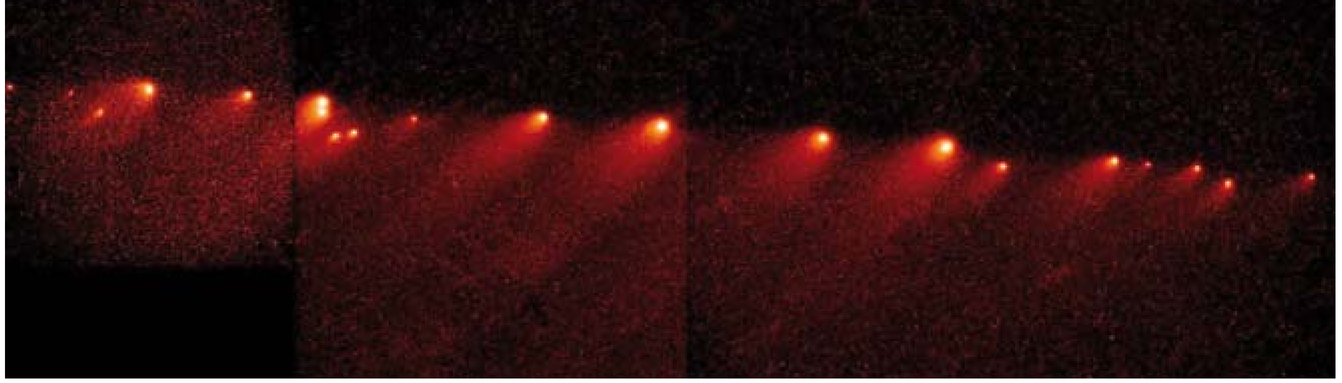
Número cuántico magnético: Es el que caracteriza la componente del momento angular de una partícula atómica con respecto a una dirección determinada por el campo magnético.

Proceso de dinamo: La intensidad de un campo magnético confinado en un sustrato conductor (por ejemplo, un plasma) aumenta cuando el sustrato se mueve. La activación del movimiento requiere alguna fuente de energía; en el caso de las estrellas, la misma puede ser la dinámica en las zonas de convección.

Tesla: Es la unidad de densidad de flujo magnético por unidad de área perpendicular a las líneas de campo. Puede representarse como la "cantidad" de líneas de campo que atraviesan una superficie. El campo magnético terrestre posee una densidad de flujo de unos 30 microtesla. Los imanes superconductores del Gran Colisionador de Hadrones del CERN, en Ginebra, exhiben densidades de flujo de 6,3 tesla.

Tubo de flujo: Es una región del espacio con forma de manguera y atravesada por un campo magnético intenso. En el Sol se conoce la existencia de tubos de flujo con diámetros que van desde los 300 a los 2500 kilómetros de longitud.

Sterne und Weltraum



se halla confinado se mueve (por ejemplo, al rotar), el campo experimenta, mediante un proceso análogo al de una dinamo, un aumento de intensidad. Ello genera una corriente eléctrica que, a su vez, retroalimenta al campo magnético. Este mecanismo se conoce como "proceso de dinamo" (*véase el glosario*). La evolución posterior puede describirse matemáticamente de manera sencilla, si bien es necesario asumir muchas simplificaciones. La enorme complejidad que se deriva de la combinación entre dinámica de plasmas y campos electromagnéticos entraña unas cuantas sorpresas.

Un ejemplo al respecto lo proporcionaron las auroras observadas tras el impacto de los fragmentos del comenta Shoemaker-Levy 9 sobre Júpiter, en 1994. Las observaciones en el ultravioleta con el telescopio espacial Hubble mostraron un aumento en las auroras del hemisferio joviano opuesto al lugar del impacto (*véase la figura 5*). La energía de rozamiento liberada en la atmósfera de Júpiter había calentado los fragmentos del cometa hasta convertirlos en bolas de fuego, lo que acabó creando un medio conductor. Los fragmentos se esparcieron a través del campo magnético de Júpiter a modo de "partículas" cargadas, con lo que generaron una diferencia de potencial a lo largo de su trayectoria. A su vez, dicha diferencia de potencial aceleró las partículas cargadas del medio, dando lugar a una corriente eléctrica circular. Finalmente, fue ésta la que provocó el incremento de la actividad auroral lejos del impacto.

Aprendiendo del Sol

Donde es más sencillo observar campos magnéticos es en objetos luminosos. A tal efecto, el campo magnético del Sol, que se extiende varios millones de kilómetros por encima de su superficie, nos brinda un laboratorio de magnetohidrodinámica único (*véase la figura 7*).

Hoy en día no se mide solamente la intensidad del campo magnético solar, sino también las anisotropías del mismo. Estas medidas se llevan a cabo casi cada día del año y poseen una alta resolución espacial. Gracias a ellas sabemos que el campo magnético global del Sol invierte su polaridad aproximadamente cada once años.

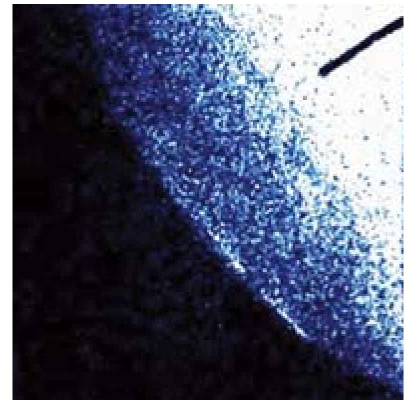
Tal regularidad no existe en el campo magnético terrestre. Aunque también en el caso de la Tierra se han constatado casos de inversiones polares, las mismas no tienen lugar periódicamente y, cuando aparecen, lo hacen a intervalos mucho mayores que en el Sol: alrededor de cada cien mil años. Ello nos beneficia, ya que una inversión polar del campo terrestre nos dejaría sin campo magnético (o con uno enormemente debilitado) durante algunos miles de años, con lo que se incrementaría el flujo de radiación cósmica. Especulaciones basadas en hechos hoy por hoy insuficientes apuntan que, en ese momento, nuestro material genético sufriría fuertes alteraciones.

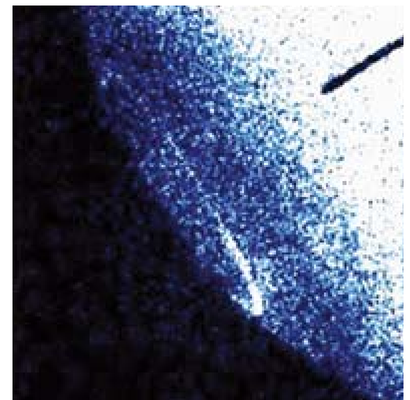
El campo global del Sol tiene una densidad de flujo de tan sólo un militesla, mientras que el de la Tierra es de unos 50 microtesla. Cuando, hacia el final de su vida, el Sol se convierta en una pequeña enana blanca de unos diez mil kilómetros de radio, el campo magnético sobre su superficie podría verse aumentado varios millones de veces, dado que el flujo magnético total se mantiene constante. Los astrónomos calculan una densidad de flujo de unos 200 tesla.

No obstante, esta representación simplificada del fenómeno se encuentra en contradicción con las observaciones: sólo un tres por ciento de las enanas blancas conocidas poseen campo magnético. Hasta hoy se han medido densidades de flujo que van desde 0,1 hasta 100.000 tesla. Recientemente, el FORS-1 (Reductor Focal y Espectrógrafo) del telescopio VLT, en el Observatorio Europeo Austral (en Chile) ha referido campos de 0,1 tesla (una densidad mínima para una enana blanca) en las estrellas centrales de nebulosas planetarias.

En el proceso de evolución estelar, dichas estrellas constituyen las predecesoras directas de las enanas blancas. Las mismas nebulosas planetarias no son sino los vestigios de la capa externa de una estrella que, como consecuencia de una inestabilidad térmica, comenzó a oscilar y acabó siendo expelida. Dichas inestabilidades se generan cuando la estrella se encuentra en el extremo superior de la denominada "rama asintótica gigante" (RAG) del diagrama de Hertzsprung-Russell (H-R, *véase la figura 8*). En esta fase, nuestro Sol podría perder la mitad de su masa.

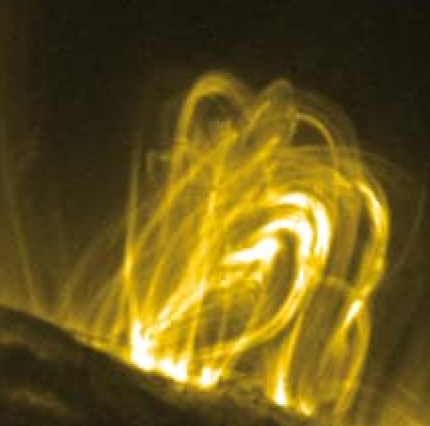
4. EL COMETA SHOEMAKER-LEVY 9 fue despedazado en más de veinte fragmentos tras su último vuelo sobre Júpiter. Esta fotografía en colores falsos del telescopio espacial Hubble procede de enero de 1994, sólo unos meses antes de que los fragmentos del cometa se precipitasen sobre Júpiter (en julio).





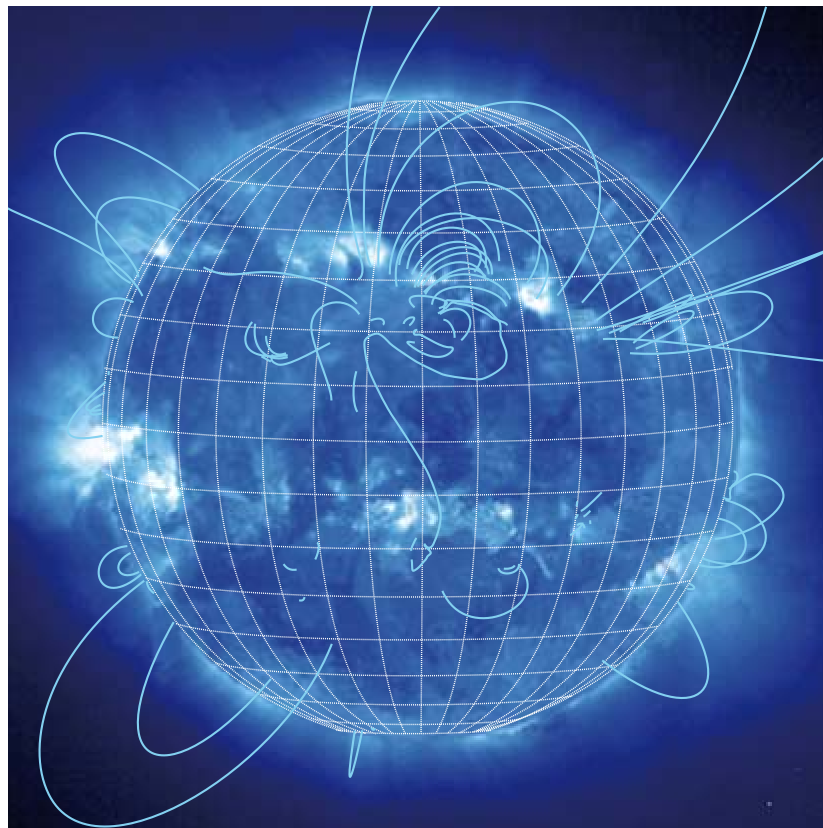
5. CAMBIOS EN LA AURORA DE JUPITER tres días antes del impacto del primer fragmento. El polvo precedente del cometa había colisionado con el plasma en el campo magnético joviano. Ambas imágenes del polo sur de Júpiter fueron tomadas en un intervalo de cinco horas.

HALT WEAVER Y T. ED SMITH, STScI/NASA/HST (*arriba*); HST (*abajo*)/Sterne und Weltraum



6. GRAN LLAMARADA DE GASES que adquieren forma de lazo en la corona solar, registrada el 4 de agosto de 2002 por el observatorio espacial TRACE. La materia ionizada fluye a lo largo de las líneas de campo magnético.

7. LINEAS DE CAMPO MAGNETICO (*azul*) sobre la superficie solar obtenidas mediante simulación numérica.



TRACE (*arriba*); KLAUS STRASSMEIER, AIP/SOHO (*abajo*)/*Sterne und Weltraum*

A día de hoy, no sabemos todavía qué acontece en ese estadio con la dinamo estelar y con el campo magnético. ¿Permanece aún activa la *dinamo Alfa-Omega* (*véase el recuadro* "Dinamo Alfa-Omega") de la estrella o, junto con su capa externa, se radia también el campo magnético? En caso de que el campo permanezca en el seno del astro, que en esta fase rota rápidamente, es de esperar que tras la RAG el viento estelar sea fuertemente colimado por las fuerzas megnetocentrífugas (las que resultan de la combinación de la magnetohidrodinámica y las fuerzas centrífugas). De todos modos, tal situación no duraría largo tiempo: un proceso de frenado magnético limitaría severamente la rotación de la estrella y acabaría por extinguir la dinamo debido a una falta de convección. De hecho, se observa una ausencia de campo magnético en las estrellas de la RAG. ¿Podrían deberse las variopintas formas de las nebulosas planetarias a la compleja geometría de los campos magnéticos? Ciertas mediciones aisladas de la polarización de las nebulosas planetarias apuntan en esta dirección.

El descubrimiento de los campos más simples

Los limitados recursos técnicos de los años cincuenta y sesenta del siglo pasado sólo posibilitaron el descubrimiento de los campos magnéticos de algunas de las estrellas más brillantes. Estas son las que poseen los campos magnéticos más intensos y de geometría más sencilla; es decir, una geometría dipolar. Fue así como el físico estadounidense Horace W. Babcock detectó, en 1947, el campo magnético de una estrella lejana: la 78 Virginis. Se trataba de una estrella caliente de tipo espectral A2, con un llamativo espectro variable que revelaba enormes abundancias de silicio, cromo, estroncio y "tierras raras", como escandio e itrio. Las estrellas de tipo A con esta curiosa composición química se denominan "estrellas Ap" (por "peculiar"). Desde entonces, 78 Virginis se ha convertido uno de los representantes clásicos de este tipo de astros.

La estrella Alfa-2 Canus Venaticorum, la componente occidental del sistema doble Cor Caroli, en la constelación de Canes Venatici ("Perros de Caza"), constituye hoy en día uno de los objetos de esa clase mejor estudiados. Por el contrario, en Alfa Centauri A, la estrella más brillante del cielo del mismo tipo que nuestro Sol, no se ha detectado todavía ningún campo magnético. Es probable que ello se deba a su pequeña escala y a una geometría multipolar, en cuyo caso las componentes individuales, con diferentes polaridades, se compensarían por el camino e impedirían su detección.

Un efecto parecido se observa en las enanas blancas. La hipótesis de un dipolo simple centrado en el eje de rotación no se corresponde con las observaciones. Hay que asumir que el eje del dipolo se halla inclinado con respecto al de rotación, considerar componentes multipolares más altas (cuadrupolos o incluso octupolos), o ambas posibilidades.

La geometría del campo de una enana blanca depende en parte de su edad. Un modelo útil al respecto lo proporciona la retroalimentación del campo toroidal debida al efecto Hall (*véase el glosario*). Para una enana blanca con una masa de 0,6 masas solares y con un campo toroidal interno (fósil) de menos de 100 kilotesla, la componente dipolar en la superficie decae al menos tres veces más rápido que la componente cuadrupolar. Una determinación exacta de la geometría del campo magnético posibilita, al menos en principio, reconstruir el proceso de gestación de una enana blanca.

Campos magnéticos en el diagrama de H-R

Las estrellas con masas de hasta dos veces y media la masa del Sol desarrollan una capa de convección externa y, muy probablemente, una dinamo Alfa-Omega interna (*véase el recuadro* "Dinamo Alfa-Omega"). Esta se activa mediante las corrientes de convección masivas que tienen lugar de modo fortuito en la capa de transición. Dichas corrientes provienen de

la capa de convección externa y se dirigen hacia la zona del núcleo, dominada por radiación. La dependencia de esta dinamo de frontera o de "interfaz" con los parámetros globales del astro (como la masa, el radio, su química o su rotación) es hoy objeto de numerosas investigaciones.

Se indaga también acerca de cómo los campos magnéticos, amplificados por la dinamo en forma de tubos de flujo, atraviesan la turbulenta zona de convección en la superficie de la estrella, así como su evolución temporal. Todos los resultados y predicciones son puestos a prueba con el modelo estelar del Sol.

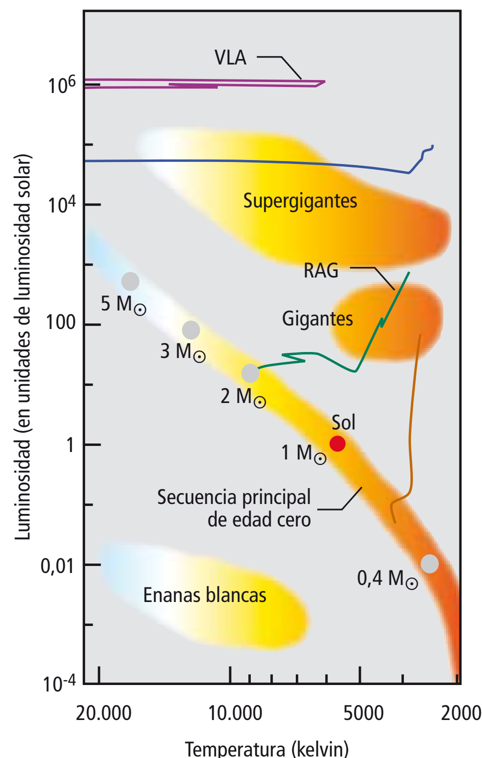
Las estrellas de tipo espectral G y K, con una mayor emisión de luz en las líneas H y K del calcio, constituyen hoy en día las mejores candidatas para realizar medidas del campo magnético en los astros del tipo del Sol con dinamos Alfa-Omega. Sus fotosferas presentan gigantescas manchas estelares: debido a la presencia de campos magnéticos locales que dificultan el transporte energético por convección desde el interior, la luminosidad de la estrella se resiente en algunas regiones. Dado que, en la mayoría de los casos, estos campos locales perduran más tiempo que el que la estrella tarda en efectuar una rotación completa, su luminosidad queda modulada por el período de rotación. Este es uno de los presupuestos de la técnica de recreación de imágenes por efecto Doppler.

Ese método de análisis utiliza series temporales de alta resolución del espectro óptico o del infrarrojo cercano. No obstante, para poder registrar de forma simultánea el efecto Doppler y los efectos Zeeman y Seares, las líneas espectrales deben observarse en la luz polarizada. Aunque esta técnica se conoce desde hace casi veinte años, estos "mapas Zeeman-Doppler" sólo se han completado para unas pocas estrellas que, por lo demás, resultan bastante exóticas en comparación con el Sol (HR 1099, AB Doradus, LQ Hydrae y II Pegasi). Para estrellas realmente similares al Sol, como Alfa Centauri A o 18 Scorpii, no disponemos todavía de este tipo de mapas.

Por otra parte, las estrellas dotadas de gran masa, como las de tipo espectral B temprano o todas las estrellas de tipo O, con masas de al menos diez veces la del Sol, poseen una capa exterior dominada por radiación. La misma llega hasta la superficie, donde la presión de radiación genera un viento estelar dominado por radiación —a diferencia de las estrellas de la RAG con masas de entre una y dos veces la del Sol, cuyo viento estelar se encuentra en su mayoría constituido por polvo—. En lugar de una dinamo de interfaz, en estas estrellas podría generarse, a través de una inestabilidad hidrodinámica, un efecto de dinamo en su interior, dominado por radiación y con una tenue rotación diferencial.

Las simulaciones numéricas muestran que, al igual que ocurre en el Sol, en esas estrellas de gran masa un impulso ascensional podría transportar hacia arriba el flujo magnético, lo que daría lugar a un campo magnético en la superficie. En dos estrellas de tipo espectral O (θ^1 Ori C y HD 191612) se han llegado a medir campos dipolares con densidades de flujo de entre 0,12 y 0,15 tesla. Por el contrario, los campos magnéticos de otras estrellas "normales" de tipo O (ζ Pup y ζ Ori) y en las del tipo B y Be (16 Peg, ω Ori y β Cep) son considerablemente más débiles. Sus densidades de flujo se encuentran, de acuerdo con las mediciones polarimétricas espectrales de las intensidades de campo, por debajo de los 15 militesla.

Una de las consecuencias clave es que, en esas estrellas, la estructura global del viento estelar (con las enormes pérdidas de masa y momento angular que el mismo acarrea) probablemente es propulsada magnéticamente, por lo que el disco en torno a las estrellas tipo Be exhibiría una magnetización igual a la de su superficie. (Estos discos se forman a partir de la expulsión del viento estelar que tiene lugar sobre todo en la región del ecuador de la estrella.) Otra consecuencia fundamental es que, en las estrellas dominadas puramente por radiación, un campo superficial muy débil



8. DIAGRAMA DE HERTZSPRUNG-RUSSELL en el que se han incluido estrellas con diferentes masas iniciales (*puntos grises y rojos*). Ellas comienzan su existencia en la región denominada "secuencia principal de edad cero" y permanecerán allí la mayor parte de su vida. En función de su masa, al final de su existencia abandonarán la secuencia principal por uno de los cuatro senderos mostrados en el diagrama (aquí trazados para cuatro masas típicas). Las estrellas con masas intermedias (entre 0,5 y 9 veces la masa del Sol) siguen la "rama asintótica gigante" (RAG).

Sterne und Weltraum

Dinamo Alfa-Omega

En este diagrama se ilustran, de forma esquemática, los efectos Alfa y Omega. El círculo exterior (*naranja*) representa la superficie de la estrella. El círculo interno (*amarillo*) la transición desde la zona de radiación del núcleo hacia la zona de convección. Las flechas indican la dirección del campo magnético. En el efecto Alfa, los fenómenos de turbulencia hacen que las componentes toroidales del campo en dos regiones dadas se eleven hacia arriba y, al mismo tiempo, las enrolla sobre sí mismas. Esto hace que el campo genere una componente poloidal que induce una corriente paralela a la componente toroidal, pero de sentido opuesto. En el efecto Omega, la rotación diferencial de la estrella hace que la componente poloidal rote hasta convertirse en una componente toroidal, reiniciando todo el proceso desde el principio.

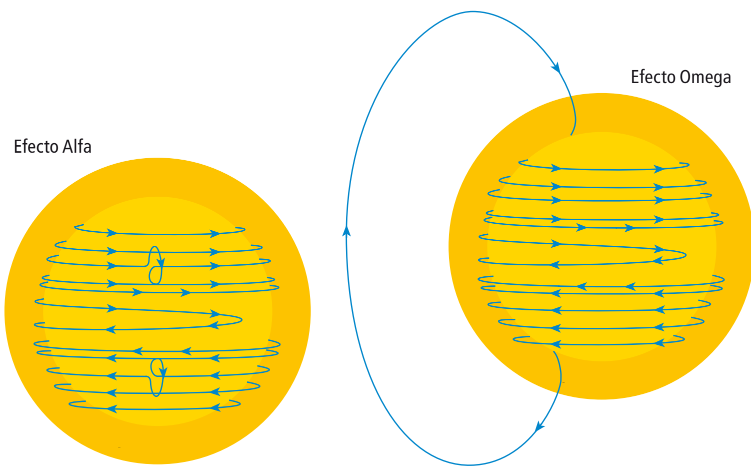


GRAFICO DE *STERNE UND WELTRAUM*, A PARTIR DE UNA ILUSTRACION DE DAVID H. HATHAWAY, DPTO. FISICA SOLAR, CENTRO MARSHALL DE VUELOS ESPACIALES, NASA

es capaz de afectar a la evolución estelar en el interior.

Las estrellas de la secuencia principal con temperaturas efectivas inferiores a los 3300 kelvin (las de tipo espectral M3,5 y superiores) presentan una estructura interna distinta. Dichas estrellas son completamente convectivas, por lo que, al igual que las estrellas de tipos B y O, no poseen una dinamo de interfaz. Debido a la falta de una estratificación dominada por radiación tampoco pueden aparecer inestabilidades hidrodinámicas. A pesar de ello, muchas de ellas manifiestan una fuerte actividad magnética, como por ejemplo algunas de las estrellas ultrafrías de tipo M (de tipo espectral M6 y posterior) e incluso algunas enanas de tipo L, lo que abarca hasta las de tipo espectral L5, con temperaturas efectivas de unos 1700 kelvin. En el caso particular de las estrellas de tipo M, la proporción de las mismas que presentan actividad magnética llega incluso al 80 por ciento.

Mediante simulaciones numéricas se han reconstruido procesos de dinamo basados puramente en convección (*dinamos*-α^2). En las estrellas aún más frías, la cantidad de tipos activos vuelve a disminuir, aunque esta disminución de la actividad magnética no obedece a una dinamo menos eficiente, sino a una reducción de la carga eléctrica neta en la materia estelar.

El descubrimiento reciente de erupciones periódicas de ondas de radio (con periodicidades de entre dos y tres horas) en algunas enanas frías de tipos M, L y T permite suponer que la activación de la dinamo no obedece a las corrientes de convección, sino que tiene un origen externo, como la presencia de planetas calientes, similares a Júpiter, que orbitan las proximidades de la estrella.

Campos magnéticos y exoplanetas: lecciones del Sol y la Tierra

Recientemente, medidas espectropolarimétricas indicaron la existencia de un campo magnético muy débil sobre la superficie de la estrella τ Bootis de la constelación de Boyero, de tipo espectral F7V. Esta estrella, por lo demás inactiva, posee un planeta similar a Júpiter orbitando a su alrededor, por lo que constituye un buen modelo para el estudio de nuestro sistema solar. Dado que los planetas de τ Bootis son planetas calientes más parecidos a Júpiter que a la Tierra, los mismos pueden inducir un fuerte campo magnético, que se acopla al de la estrella.

Uno de tales procesos de reconexión (una suerte de “cortocircuito magnético”, en el que las líneas de campo se entrelazan y liberan energía magnética) puede provocar un aumento de destellos o explosiones de energía con una modulación determinada por el período orbital del planeta en torno a la estrella. Esas explosiones implican emisiones no térmicas de ondas de radio y rayos X. Dicho proceso se da en estrellas binarias eclipsantes activas con órbitas muy excéntricas, como RS Canum Venaticorum. Ello explicaría las erupciones de ondas de radio en el caso de las enanas frías de tipos M, L y T, así como en las estrellas de tipo G, similares al Sol. Hoy en día, el máximo objetivo a la vista sería separar el espectro de emisión del planeta y determinar su campo magnético, algo quizá posible a partir de las líneas de emisión molecular de su atmósfera.

Hace poco, el Instituto Politécnico Federal suizo (en Zúrich) confirmó la existencia de un planeta a partir de la polarización de la luz procedente de la estrella y reflejada en la superficie del planeta. Desde La Palma, usando un telescopio de 60 centímetros, los investigadores han medido, a lo largo de varios años, la modulación periódica de la luz polarizada procedente de la estrella HD 189733. Sin embargo, el éxito en la búsqueda de campos magnéticos en exoplanetas quizás aún se haga esperar. Se esperan indicaciones indirectas con los telescopios de entre 30 y 40 metros del

El autor

Klaus G. Strassmeier estudió en Graz, Heidelberg y Viena y se doctoró en 1987. Desde el año 2000 es director del Instituto Astrofísico de Potsdam y catedrático de astrofísica en la Universidad de Potsdam. Investiga en el área de espectroscopía de alta resolución y tomografía Doppler.

Telescopio Espacial James Webb. Hasta que ello ocurra, nuestros conocimientos acerca de la interacción entre el viento estelar y la materia interplanetaria habrán de limitarse a nuestro sistema solar.

Por lo demás, nada podemos decir todavía acerca de la interacción entre el campo magnético del Sol (o el del resto de las estrellas) con el de la galaxia a lo largo de las aproximadamente veinte vueltas que, en el transcurso de su historia, el astro ha completado en torno al centro de la Vía Láctea.

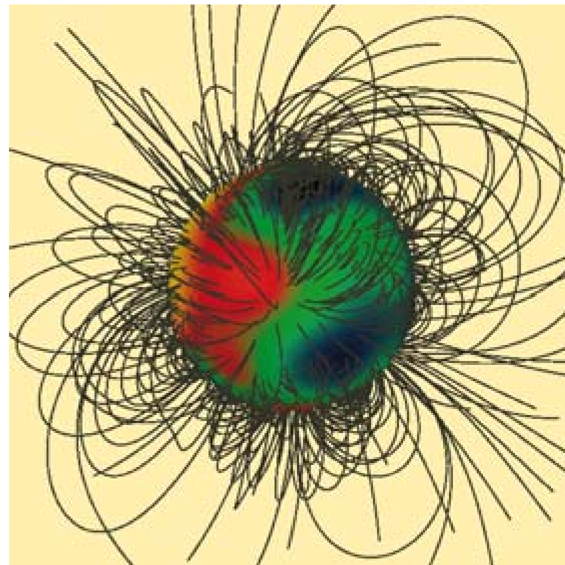
"¿Puede despreciarse el campo magnético?"

En el caso de un planeta, la fuerza gravitatoria ejercida por su estrella es muy superior a la magnética (en una proporción de varias decenas de millones). Por el contrario, sobre un ion de hidrógeno del viento solar que viaja a una velocidad de 20 kilómetros por segundo, el campo magnético interplanetario actúa con una fuerza diez millones de veces superior a la atracción ejercida por el Sol.

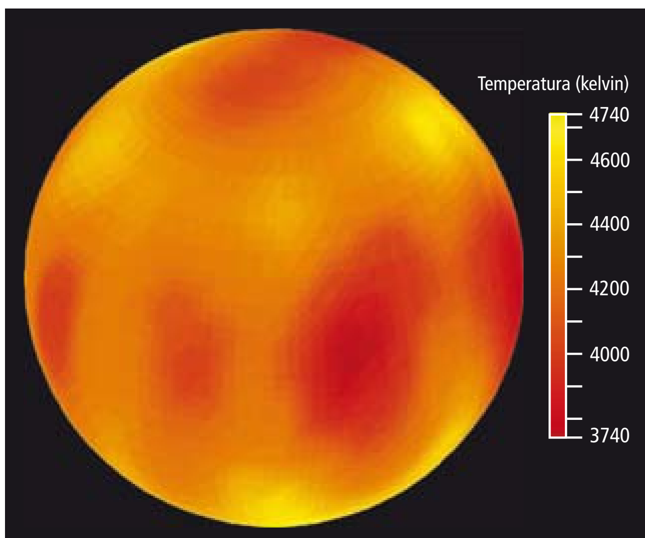
Otro ejemplo de los efectos del campo magnético sobre la materia lo proporciona el proceso de gestación de una estrella. Una nube interestelar colapsa cuando se alcanza en ella una cierta densidad crítica y la atracción gravitacional supera la presión de los gases. No obstante, dicho colapso habría de ocurrir más deprisa de lo que muestran las observaciones. La razón obedece a la existencia de turbulencias inducidas por los campos magnéticos, que frenan la gestación estelar hasta las tasas observadas.

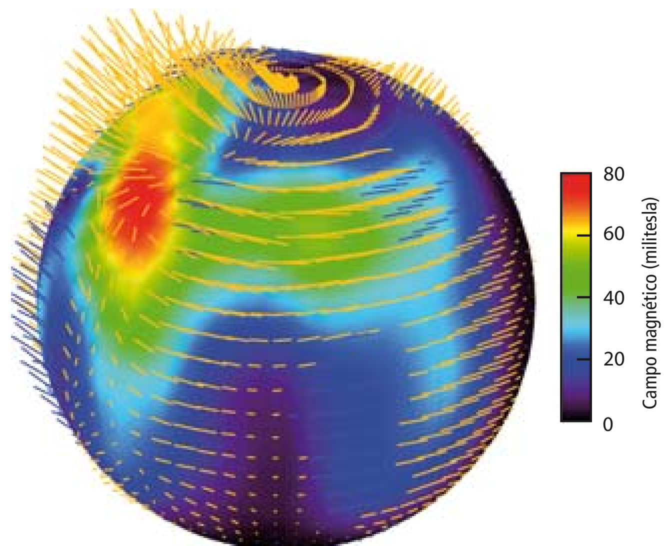
En un estadio posterior del colapso, las fuerzas centrífugas impiden la formación de un cuerpo esférico. Para que la estrella nazca, el momento angular debe ser radiado. Aquí son de nuevo los campos magnéticos los que activan turbulencias en el disco protoestelar y propician, con ello, una expulsión eficiente del momento angular. Esta inestabilidad magnetorrotacional se ha observado en el experimento PROMISE con galio en rotación diferencial. Las diferencias obtenidas en simulaciones numéricas con y sin campo magnético son notables: en el caso de una nube con una masa igual a la de Sol, se genera, sin campo magnético, una única estrella. Con idénticas condiciones iniciales pero con campo magnético, el resultado del colapso es un sistema binario.

Los argumentos para despreciar los efectos de los campos eléctricos y magnéticos en la formación de estructuras y cúmulos galácticos obedecen a las distancias asociadas a esos procesos, mucho mayores que el rango de alcance de la fuerza magnética. Sin embargo, tal razonamiento se muestra erróneo. Si bien un campo magnético no es de inmediata re-



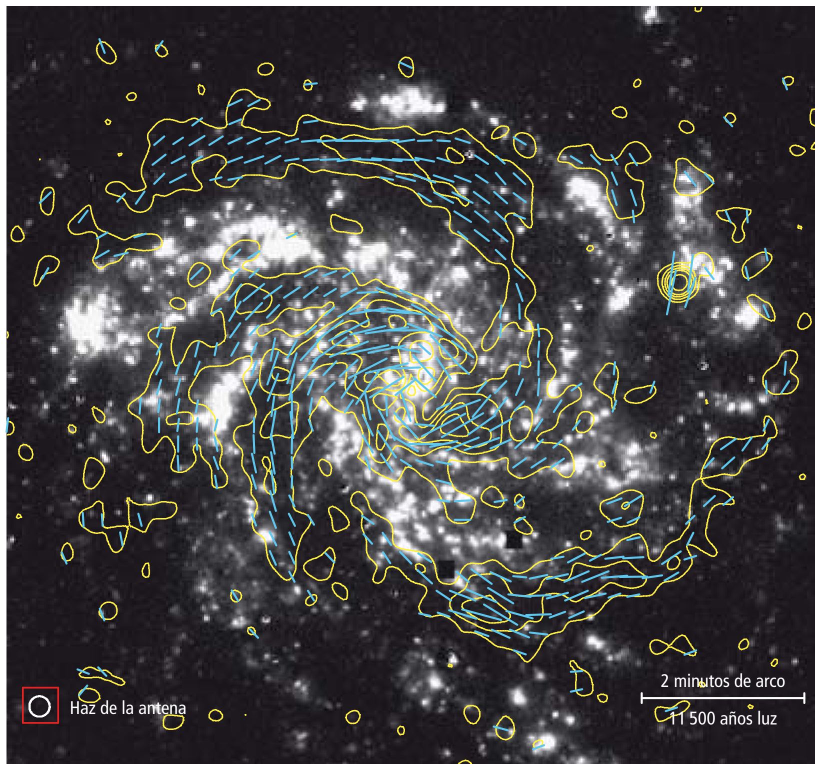
9. EL CAMPO MAGNETICO de la superficie de la enana blanca EF Eridani, reconstruido gracias a la técnica de Zeeman-Doppler.





10. DISTRIBUCION DE TEMPERATURA (*izquierda*) frente a un mapa Zeeman-Doppler del campo magnético (*derecha*) de la superficie de la estrella II Pegasi, de tipo espectral K. La intensidad del campo se representa mediante una escala de colores: el negro denota la ausencia de campo y el rojo una densidad de flujo de unos 0,08 tesla. Las líneas indican la geometría local del campo. Una pregunta básica es si el campo magnético afecta al desarrollo estelar y, en su caso, cómo lo hace.

KLAUS STRASSMEIER, AIP/*Sterne und Weltraum*



11. EL CAMPO MAGNETICO DE LA GALAXIA ESPIRAL NGC 6946 (*amarillo*), obtenido a partir de mediciones polarimétricas en una longitud de onda de seis centímetros. La dirección local del campo magnético se indica mediante líneas azules de longitud proporcional a la intensidad del campo. La imagen de fondo es una fotografía óptica de la línea de emisión alfa del hidrógeno, que indica la presencia de gas neutro. Destaca el hecho de que el campo es más intenso en la región comprendida entre los brazos de la galaxia.

levancia dinámica para un plasma, en el caso de grandes volúmenes y pequeñas densidades de materia el campo magnético puede, con todo, generar densidades de energía relevantes para la formación de estructuras. Ello también ocurre cuando el "radio" de la órbita de una partícula cargada alrededor de una línea de campo magnético es menor que la longitud media de una trayectoria típica. En el espacio intergaláctico, por ejemplo, donde las trayectorias libres de las partículas son enormes, basta con un campo magnético de unos 10^{-24} tesla para activar una dinamo galáctica.

Por último, en galaxias espirales como NGC 6946 se alcanzan densidades de energía que, salvo en el centro galáctico, quedan dominadas por la componente magnética (*véase la figura 11*). Es más: este predominio radial de la componente magnética podría inducir el mismo efecto sobre la curva de rotación de una galaxia que la hipotética materia oscura circundante [*véase* "Cuestiones fundamentales de cosmología", por P. Schneider; Investigación y Ciencia, junio de 2010].

Campos galácticos

La radiación de radio de larga longitud de onda, detectada por Karl Jansky en 1932 con su primer radiotelescopio, supuso la primera medida del campo magnético de la Vía Láctea. En su momento, sin embargo, este hecho pasó desapercibido; no sería sino hasta veinte años después cuando Hannes O. G. Alfvén (1908-1995) y Karl-Otto Kiepenheuer (1910-1975) interpretarían con detalle el resultado. Esa radiación polarizada es emitida por electrones relativistas que describen una trayectoria helicoidal en torno a las líneas de campo magnético. De hecho, el campo magnético medio de una galaxia espiral puede determinarse a partir de la intensidad de esta radiación de sincrotrón. Los indicadores del campo magnético en objetos difusos (como galaxias, la materia interestelar o las regiones de formación de estrellas) son la polarización lineal de ese continuo de radiación de sincrotrón, así como la rotación de su plano de polarización en función de la longitud de onda (efecto Faraday).

Al efecto Zeeman no se recurriría hasta finales de los años sesenta, cuando se detectaron la línea de 21 centímetros de emisión del hidrógeno neutro y otras líneas de emisión moleculares. Al contrario de lo que ocurre con las medidas de los campos magnéticos estelares, este método resulta de muy difícil aplicación en el caso de las galaxias, ya que requiere la presencia de nubes de gas específicas que permitan observar las líneas de emisión. No sorprende, por tanto, que el campo magnético de la Vía Láctea fuese descubierto a partir de medidas estelares: en 1948, William Hiltner y John Hall observaron luz linealmente polarizada en el espectro de estrellas de tipo B. Un año después, Leverett Davis y Jesse Greenstein explicaron el fenómeno como consecuencia de la difusión de la luz al atravesar los granos de polvo interestelar, alineados por el campo magnético de la galaxia.

Indicios de una dinamo galáctica

La estructura del campo magnético de las galaxias espirales sigue, por lo general, la de los brazos de la galaxia, formados por estrellas y nubes de gas (*véase la figura 12*). Sin embargo, las regiones con mayores intensidades de campo no se hallan en los brazos en sí, sino en su periferia o incluso en las regiones entre los brazos. Esto es de esperar, dado que las estrellas y el gas no se desplazan a lo largo de los brazos, sino que describen órbitas keplerianas (o similares) en torno al centro galáctico (*véase la figura 13*). La velocidad típica de los gases es de unos diez kilómetros por segundo a lo largo de distancias de unos 300 años luz. La viscosidad turbulenta asociada a esos gases debería deformar las estructuras galácticas con tamaños de unos 3000 años luz en un tiempo inferior a los mil millones de años. Algo que no se observa.

El fenómeno apunta hacia la existencia de una dinamo galáctica. Ello refutaría la idea de que el campo magnético de gran escala de la galaxia no es más que el campo magnético

RAINER BECK Y PHILIPP HOERNES, INSTITUTO MAX PLANCK DE RADIOASTRONOMIA/*Sterne und Weltraum*

ya presente desde sus comienzos, "ovillado" e intensificado debido a la contracción. Bajo la hipótesis de equipartición (iguales densidades de energía magnética y cinética) puede evaluarse la intensidad del campo, donde la creación de campo magnético por efecto de la dinamo galáctica compensaría la disipación debida al movimiento turbulento del gas. Los resultados concuerdan espectacularmente bien con las observaciones (centésimas de nanotesla).

La estructura del campo magnético no sigue, por tanto, el movimiento local del gas. De ser así, el movimiento kepleriano diferencial hubiera provocado el "enrollado" del campo. De modo parecido las "ondas de densidad" en los brazos de la galaxia, la estructura espiral del campo magnético puede interpretarse como una "onda de dinamo". Esta orbitaría en torno al centro de la galaxia pero con un cierto desfase, sin necesidad de estar directamente relacionada con la velocidad de rotación de la misma.

Campos magnéticos cósmicos: ¿la gallina o el huevo?

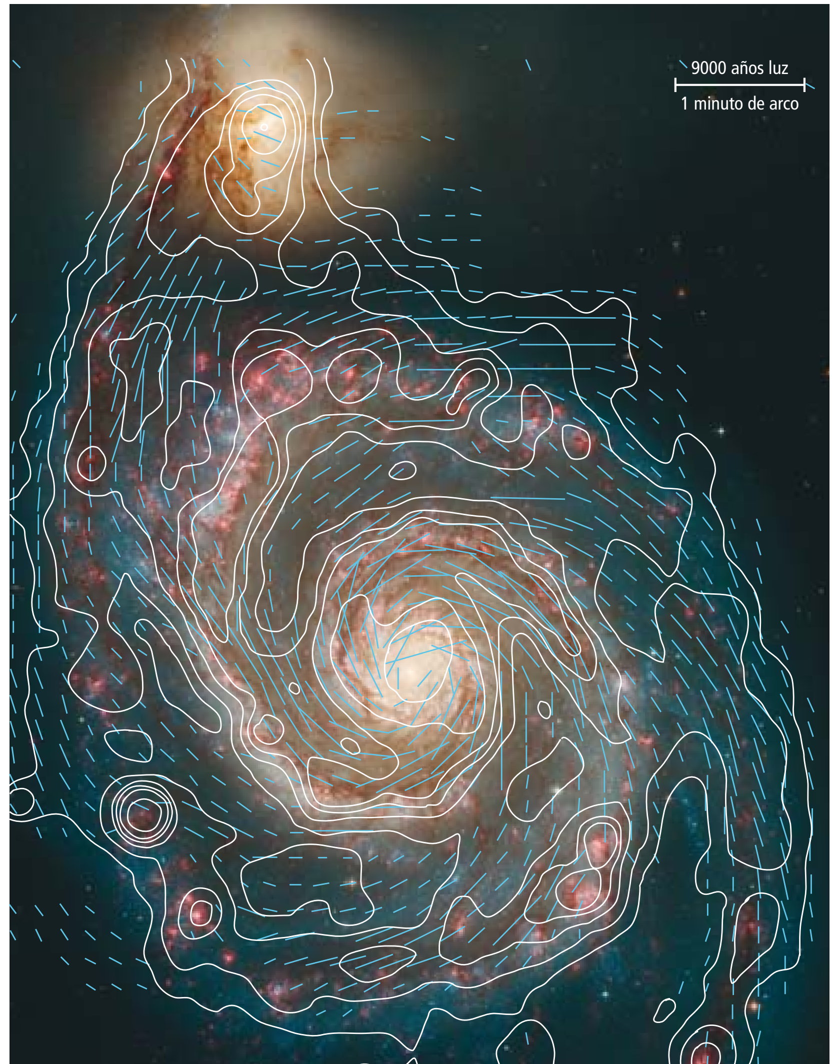
Los campos electromagnéticos influyen en el movimiento de las partículas dotadas de carga eléctrica en un plasma. Por otro lado, la propia dinámica del plasma es una fuente de campo electromagnético. ¿Qué tiene lugar en primera instancia, el plasma en movimiento o el campo magnético "germen"? Además, los campos magnéticos también pueden generarse indirectamente aun en ausencia de procesos dinámicos (pensemos en las reacciones químicas de una batería). Hoy en día seguimos aún sin saber si los campos magnéticos cósmicos se generaron tras la reionización del universo (ya fuese mediante procesos de dinamo o a partir de mecanismos no dinámicos) o si, por el contrario, se originaron con anterioridad.

La idea de un campo magnético primordial se ofrece muy atractiva, ya que explicaría la totalidad de los campos magnéticos cósmicos como fruto de los procesos de dinamo. Todos los modelos cosmológicos modernos parten de una gran explosión seguida de una fase de expansión inflacionaria; de hecho, apuntan a la inflación como una de las posibles fuentes de campo primordial.

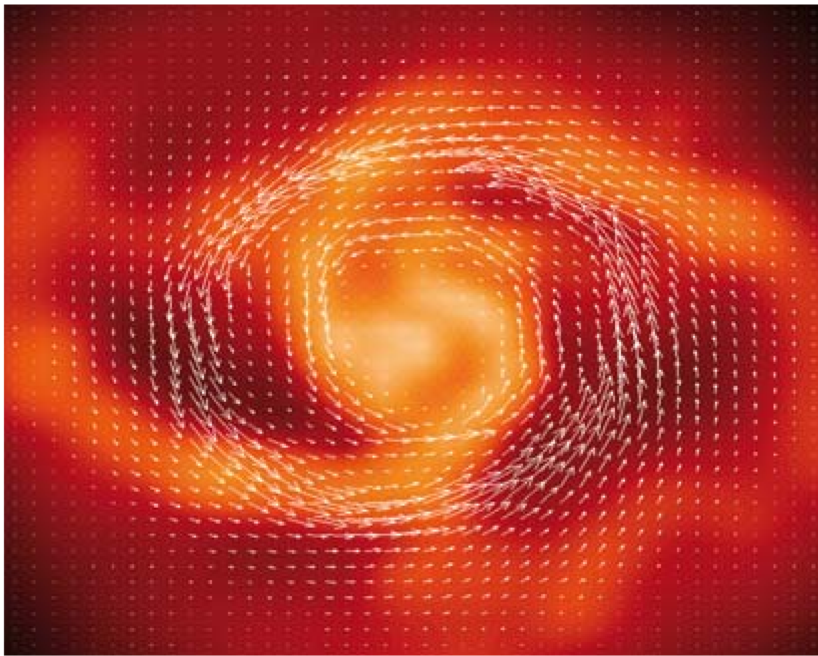
El problema de esa hipótesis estriba en que, tras la inflación, la disminución en la intensidad del campo (debida a la enorme expansión del universo) habría sido muy acusada. El campo resultante nunca hubiera bastado para actuar como campo germen de todos los procesos de dinamo que conocemos hoy en día: si asumimos una disminución cuadrática del campo (una especie de decrecimiento adiabático; es decir, que conserva la energía interna), resultan valores inferiores a los 10^{-29} tesla.

Durante la inflación, con temperaturas del orden de 10^{14} gigaelectronvolt, los campos magnéticos no pudieron haberse inducido a partir de la simple expansión del espacio. Sólo a partir de un campo cuántico intrínseco hubiese logrado la expansión inducir un campo magnético. En ausencia de tales campos cuánticos, el proceso de inducción de campos magnéticos hubiera debido esperar a la fase de transición electrodébil (momento en que la fuerza electromagnética y la fuerza nuclear débil se diferenciaron), con temperaturas asociadas de unos 200 gigaelectronvolt. Este fue también el momento en el que se generó la materia bariónica ordinaria. Sin embargo, en el modelo cosmológico estándar, ambos mecanismos generadores (inducción de campo y densidad bariónica) son demasiado ineficientes para explicar los campos magnéticos galácticos o intergalácticos actuales. El asunto es aún más complejo, ya que la expansión del espaciotiempo debería haber provocado una

12. CAMPO MAGNETICO DE LA GALAXIA ESPIRAL M51, obtenido a partir de las mediciones en longitud de onda de seis centímetros con el telescopio de 100 metros de Effelsberg y el Very Large Array (EE.UU.). El contorno muestra la radiación de ondas de radio, la cual constituye una medida de la intensidad del campo magnético. Las líneas azules indican la dirección del campo magnético. La imagen óptica fue tomada por el telescopio espacial Hubble.



A. FLETCHER/R. BECK/NASA/ESA/S. BECKWITH (STScI)/THE HUBBLE HERITAGE TEAM (STScI/AURA)/*Sterne und Weltraum*



13. EL CAMPO MAGNETICO DE UNA GALAXIA ESPIRAL según se muestra en una instantánea de una simulación numérica. El color representa la distribución de gas neutro; las flechas indican la dirección e intensidad del campo magnético. Las densidades de flujo más altas no coinciden con los brazos de la galaxia, sino que aparecen en sus bordes o incluso en las regiones entre los brazos.

A PARTIR DE UN CALCULO DE D. ELSTNER CON EL CODIGO ZEUS, AIP/*Sterne und Weltraum*

curvatura del campo magnético y, con ella, una tensión magnética que hubiera contrarrestado la expansión.

El problema básico del escenario primordial es, como antes, la transición desde la enorme expansión y las gigantescas diferencias de escala asociadas. Si el campo primordial constituye el campo germen de todos los campos galácticos generados por una dinamo, su escala debería haberse visto reducida desde la escala de Hubble en los tiempos de la expansión hasta el tamaño típico de las galaxias actuales. (Durante la expansión del universo, la escala de Hubble en cada instante se define como la distancia recorrida por un fotón desde el momento de la gran explosión.)

Dicha reducción de escala no puede haber tenido lugar sin una producción significativa de ondas gravitacionales. Pero ello no se ajusta a las observaciones. Además, entra en conflicto con las mediciones de la abundancia de helio. Para que la hipótesis fuese compatible con los datos experimentales, los procesos de nucleosíntesis hubieran debido prolongarse hasta que las ondas gravitacionales representasen sólo una fracción despreciable de la densidad de energía del universo. Cada modelo propuesto de creación inflacionaria fracasa en este punto. El problema desaparece, sin embargo, si la creación primordial de campo se sitúa mucho más tarde, en la fase de reionización del universo.

Hace poco se publicaron una serie de artículos en la revista *Science* en los que se argumentaba que la velocidad diferencial de electrones y fotones, así como el acoplamiento de la velocidad de los electrones con el campo anisótropo de fotones, podía ser una fuente de campo magnético. Un campo anisótropo es aquel en el que la presión del campo se dirige en una dirección particular (debido, por ejemplo, a perturbaciones en la densidad de energía). Se calcularon intensidades de campo de $10^{-20,5}$ tesla, que, tras la expansión posterior, se reducían a $10^{-26,5}$ tesla. En la subsiguiente creación de galaxias, este campo aumentaría su intensidad en aproximadamente un factor 1000 debido al acoplamiento con el movimiento del plasma que da lugar a la galaxia. Así se alcanzarían unas intensidades de campo con las que una galaxia ya puede poner en funcionamiento una dinamo y generar, en su tiempo de vida, la intensidad de campo de unas cuantas centésimas de nanotesla que observamos hoy en día.

Perspectivas futuras

Los campos magnéticos constituyen, cada vez en mayor medida, un campo activo de la investigación astrofísica. Muchos nuevos telescopios y otros instrumentos se orientarán hacia esta problemática. El radiointerferómetro numérico LOFAR, con base en Holanda y estaciones en Alemania y Reino Unido, cuenta con proyectos clave para investigar los campos magnéticos cósmicos.

Por su parte, las mediciones de los campos magnéticos estelares se hallan en auge. En los próximos años podrían alcanzar su cénit gracias al polarímetro espectral de alta resolución PEPSI, situado en el Gran Telescopio Binocular (LBT) de Arizona, con dos espejos de 8,4 metros.

Un reciente congreso trató el tema de cómo habría de ser el instrumental en el proyectado telescopio europeo de 42 metros del E-ELT (del inglés para "Telescopio Europeo Extremadamente Grande") del Observatorio Europeo Austral. También aquí se impone la necesidad de contar con mediciones de polarización espectral. Finalmente, uno de los principales objetivos del proyecto internacional SKA (Square Kilometer Array) es proporcionar una respuesta a la cuestión del campo magnético primordial.

Es un asunto difícil, pero, "¿por qué lo primero en existir debería haber sido la nada?" (adaptación libre del filósofo Günther Anders).

Bibliografía complementaria

JUPITER-STURZ ÜBERTRAF ALLE ERWARTUNGEN. D. Fischer en *Sterne und Weltraum*, octubre de 1994.

AKTIVE STERNE: LABORATORIEN DER SOLAREN ASTROPHYSIK. K. G. Strassmeier. Springer-Verlag, 1997.

THE MAGNETIC UNIVERSE. GEOPHYSICAL AND ASTROPYSICAL DYNAMO THEORY. G. Rüdiger y R. Hollerbach. Wiley-VCH, 2004.

NEUE BLICKE IN DAS INNERE DER SONNE. M. Roth en *Sterne und Weltraum*, agosto, págs. 24-32; 2004

COSMIC MAGNETIC FIELDS, LECTURE NOTES IN PHYSICS. Dirigido por R. Wielebinski y R. Beck. Springer-Verlag, 2005.

UNSERE SONNE-MOTOR DES WELTRAUMWETTERS en *Sterne und Weltraum-Spezial*, enero de 2007.

FEURIGER WELTUNTERGANG. K. P. Schröder en *Sterne und Weltraum*, julio de 2008.

PER SOFTWARE ZU DEN STERNEN. H. Falcke y R. Beck en *Spektrum der Wissenschaft*, julio de 2008.

Reformas políticas a ciegas

El debate sobre la sanidad pública, el cambio climático y otros temas complejos exigen una mayor participación de la población y los expertos

Jeffrey D. Sachs

La larga y controvertida disputa sobre la reforma sanitaria en EE.UU. ha puesto al descubierto debilidades básicas en el proceso de gobierno. Como sucede a menudo, los políticos y miembros de grupos de presión han acaparado los temas de mayor complejidad, dejando que los expertos y la población se ocuparan sólo del análisis de asuntos marginales. Aunque la ley definitiva aumenta la cobertura, razón por la que la apoyo, se queda corta en las medidas necesarias para rebajar costes y mejorar los resultados sanitarios.

En los catorce meses de debate sobre asistencia sanitaria, la administración no presentó un libro blanco con un análisis político claro sobre los objetivos, los métodos y los resultados esperados de las reformas planteadas. La única evaluación hasta cierto punto sistemática sobre las propuestas legislativas fue llevada a cabo por la Oficina Presupuestaria del Congreso; no existe un análisis independiente equiparable sobre otras cuestiones fundamentales. Nunca se examinaron ni se debatieron con coherencia las verdaderas consecuencias que tendría la ley en la sanidad. En la cumbre sobre asistencia sanitaria de febrero, que duró un día, se puso en evidencia el problema. El presidente, el vicepresidente, la ministra de Salud y Servicios Humanos y el asesor principal del presidente en cuestiones de sanidad (un abogado) se reunieron con 38 miembros del Congreso. Se contó con la participación de tres médicos, congresistas republicanos que se oponían a los planes de la administración; pero brillaban por su ausencia los especialistas en sanidad pública, los economistas de la salud, los portavoces de la sociedad civil, los líderes de organizaciones de conservación de la salud y los representantes de otras organizaciones de asistencia sanitaria. En la reunión se discutió quién pagaría qué, y no cómo organizar las prestaciones sanitarias para conseguir mejores resultados a más bajo coste.

MATT COLLINS

Uno podría pensar que el verdadero debate ya había tenido lugar con anterioridad, en las audiencias parlamentarias, en las reuniones de intercambio de ideas y en las sesiones de negociaciones con las principales partes interesadas. El proceso inicial estuvo determinado por cálculos políticos y grupos de presión, sin la participación informada de la ciudadanía, a quien tan sólo permitieron expresarse en tertulias y *blogs*. Muchos observan que la ciclópea ley es inexpugnable. Nunca se invitó de modo sistemático a los expertos para que opinaran o debatieran sobre ella, y ayudaran así a la ciudadanía y a los políticos a entender los problemas. La falta de documentos políticos claros de la administración llevó a una reacción limitada de la población, que no pasó más allá de los instintos viscerales y los sentimientos de temor avivados por los presentadores de los programas de entrevistas.

A menudo nuestro sistema político se olvida de recurrir a los más preparados para encontrar soluciones inteligentes a nuestros problemas. Sin duda también ha actuado así en la cuestión del cambio climático, manteniendo a la comunidad de expertos del país alejada de la elaboración del anteproyecto legislativo. Igual como ha sucedido con la asistencia sanitaria, el anteproyecto de ley del Congreso y el Senado carece de respaldo público. Lo mismo se puede afirmar del conflicto en Afganistán: el "gabinete de guerra" ha demostrado una gran falta de conocimiento sobre los problemas relativos a la cultura, la economía y el desarrollo del país, y ha mantenido a la población estadounidense desinformada sobre las verdaderas opciones en la gestión del conflicto.

Para mejorar el diseño de las políticas, la administración debería presentar un análisis detallado, con la justificación de cada propuesta de cambio importante. Ese libro blanco podría servir de base para una reflexión y un debate público



coherente. Se contaría con la intervención de expertos externos en sitios de Internet, donde las opiniones se compartirían con la ciudadanía. También se invitaría a la población a participar en un *blog* sobre ese libro blanco. Asimismo, se colgaría una versión del proyecto de ley comprensible para ciudadanos legos (junto con la jerga legal más técnica e inevitable), abierta a las valoraciones que pudieran emitir los expertos y la población a través de la Red. La administración y el Congreso confiarían más en comisiones de asesoramiento externas para aprovechar los numerosos especialistas del país y servirse de la opinión del mundo empresarial, académico y de otros sectores de la sociedad.

En nuestros sistemas de gestión actuales, la complejidad intrínseca de los retos exige dejar atrás las corazonadas y la inexperiencia de la maquinaria del gobierno existente. No aceptaría ni recomendaría dejar las decisiones en manos de supuestos expertos, que a menudo representan intereses particulares o tienen una visión sesgada o estrecha del tema en cuestión. En cambio, un examen sistemático de las opciones políticas, con el debate y la opinión de expertos reconocidos y de la población, mejoraría en gran medida nuestros resultados políticos, en los que a menudo vamos a ciegas o dejamos que nos guíen intereses y puntos de vista particulares.

Jeffrey D. Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia.

El problema de las doce monedas

Cómo impresionar a los entrevistadores de Google

Gabriel Uzquiano

Hace unos meses apareció en la blogosfera una lista de preguntas formuladas por Google en sus entrevistas de trabajo, como cuántas veces al día se cruzan las manecillas de un reloj o cuántos afinadores de piano existen en el mundo. Quisiera discutir una de esas preguntas, no tanto por su dificultad sino más bien por su relación con un problema tradicional y mucho más interesante.

Disponemos de una balanza de platos y ocho bolas del mismo tamaño, una de las cuales pesa más que el resto. Debemos identificarla usando la balanza sólo dos veces.

Una solución es la siguiente. Tras enumerar las bolas, comparamos las bolas 1, 2 y 3 con las bolas 4, 5 y 6. Si pesan lo mismo, entonces la bola más pesada será la 7 o la 8. Si no, se encuentra en el grupo de bolas que más pese. Si éstas son 1, 2 y 3, nuestro siguiente paso será comparar 1 y 2. Si ambas pesan lo mismo, entonces la bola que buscamos es la 3; si no, se trata de la que más pese. Por último, si 4, 5, y 6 fueron las bolas que pesaron más en el primer uso de la balanza, basta con proceder de modo análogo al descrito para 1, 2 y 3.

Más difícil es el problema cuando estipulamos que una de las ocho bolas tiene un peso diferente, pero sin especificar si es mayor o menor que el de las restantes. Como veremos después, en este caso hace falta un mínimo de tres usos de la balanza si, además, queremos averiguar si la bola en cuestión pesa más o menos que el resto. El que sigue constituye un problema mucho más interesante:

Disponemos de una balanza de platos y doce monedas. Aunque sabemos que una de ellas no pesa lo mismo que las otras, no sabemos si pesa más o menos que el resto. ¿Cuántas veces necesitamos utilizar la balanza para averiguar no sólo la identidad de la moneda defectuosa, sino también si pesa más o menos que el resto?

Aunque se desconoce su origen, algunas versiones de este problema ya circulaban por Inglaterra antes de la segunda guerra mundial. Existen muchas soluciones, pero aquí quisiera presentar una versión de la que me parece más elegante. La misma data de los años cuarenta y se debe a F. J. Dyson y R. C. Lyness.

En primer lugar, notemos que el problema no puede resolverse con menos de tres pesajes. La razón se debe a que hemos de distinguir entre veinticuatro posibilidades (cada una de las doce monedas puede pesar más o menos que el resto). Sin embargo, cada uso de la balanza tiene sólo tres resultados posibles: la balanza se inclina hacia la izquierda (**I**), permanece en equilibrio (**E**), o se inclina hacia la derecha (**D**). Se sigue que dos pesajes nos permiten distinguir tan sólo nueve posibilidades: **II**, **EI**, **DI**, **IE**, **EE**, **DE**, **ID**, **ED**, **DD**. Tres pesajes, por otra parte, nos permiten distinguir muchas más: veintisiete en concreto.

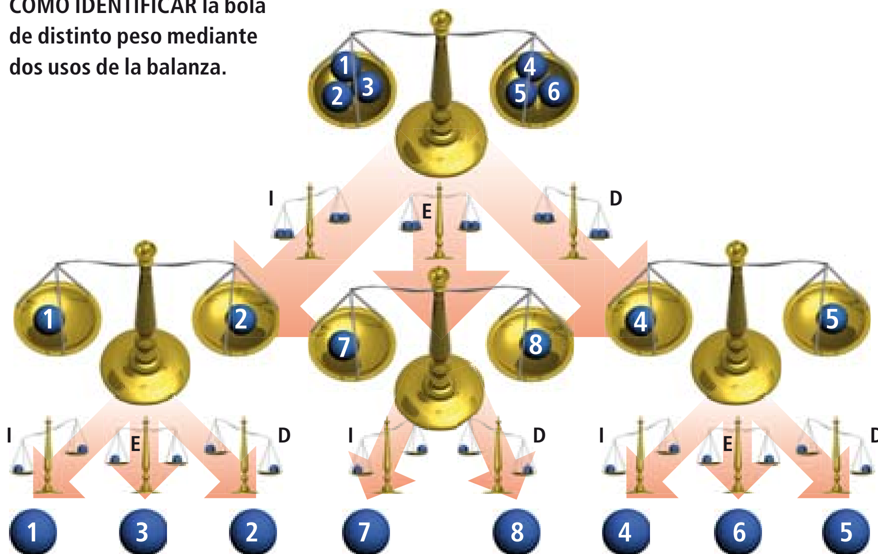
Nuestra estrategia va a consistir, en primer lugar, en asignar una etiqueta a cada moneda siguiendo un procedimiento mucho más elaborado que la numeración de las bolas en el primer problema. Una vez etiquetadas, estableceremos las instrucciones precisas para saber qué monedas colocar a la izquierda o derecha de la balanza en cada uso.

A cada moneda le asignaremos dos secuencias de tres de las letras anteriores, y escribiremos cada secuencia en el anverso y reverso, respectivamente, de la etiqueta correspondiente. Como veremos, el anverso de cada etiqueta describirá la secuencia de resultados que obtendríamos tras los tres pesajes si se diera el caso de que la moneda asociada pesase más que el resto; el reverso describirá la secuencia de resultados si la moneda correspondiente pesase menos que las demás.

Necesitamos, en primer lugar, escoger las doce secuencias que figurarán en el anverso de cada etiqueta. Un método para obtenerlas consiste en partir de cierta ordenación de las letras de las que disponemos. Consideremos, en particular, el orden cíclico **D**-**E**-**I**-**D** (el que resulta del orden alfabético habitual tras añadir una segunda ocurrencia de la letra **D**). Escojamos ahora las secuencias de tres letras (con o sin repetición) con la siguiente característica: la primera vez que aparecen dos letras diferentes lo hacen en el orden que hemos especificado. Dicho de otro modo, la primera variación en cada secuencia es bien de la forma **DE**, bien **EI** o bien **ID**. Hay doce de tales secuencias:

DED	EID	IDD
DEE	EIE	IDE
DEI	EII	IDI
DDE	EEI	IID

COMO IDENTIFICAR la bola de distinto peso mediante dos usos de la balanza.



¿Cómo obtener el reverso de cada etiqueta? La respuesta es simple: basta con intercambiar cada **D** en el anverso por una **I** en el reverso, y viceversa. Disponemos, por tanto, de doce nuevas secuencias para el reverso de cada una de nuestras etiquetas:

IEI	EDI	DII
IEE	EDE	DIE
IED	EDD	DID
IIE	EED	DDI

Ahora que hemos especificado el anverso y reverso de cada etiqueta, basta con describir las instrucciones acerca de cómo proceder en cada pesaje.

¿Qué monedas habremos de colocar en cada plato? En cada uso dispondremos cuatro monedas en cada plato de la siguiente forma:

En el primer pesaje:

- Colocaremos a la izquierda aquellas monedas cuyas etiquetas tengan una **I** como primera letra en el anverso.
- Colocaremos a la derecha aquellas monedas cuyas etiquetas tengan una **D** como primera letra en el anverso.

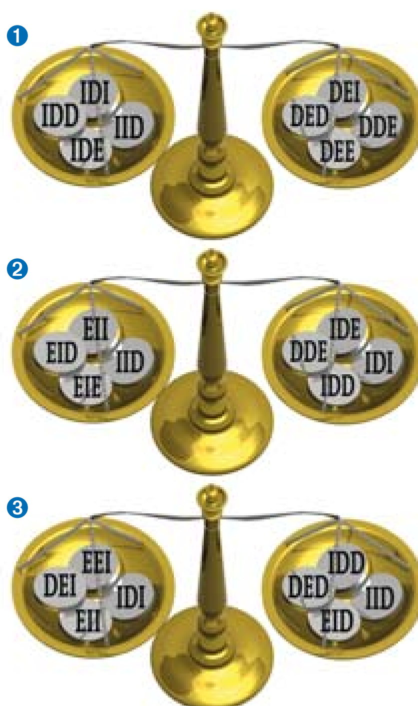
En el segundo pesaje:

- Colocaremos a la izquierda aquellas monedas cuyas etiquetas tengan una **I** como segunda letra en el anverso.
- Colocaremos a la derecha aquellas monedas cuyas etiquetas tengan una **D** como segunda letra en el anverso.

En el tercer pesaje:

- Colocaremos a la izquierda aquellas monedas cuyas etiquetas tengan una **I** como tercera letra en el anverso.
- Colocaremos a la derecha aquellas monedas cuyas etiquetas tengan una **D** como tercera letra en el anverso.

El siguiente diagrama describe la distribución de monedas en cada plato (denotadas según lo que figura en el anverso de su etiqueta) y en cada pesaje:



Nótese que no hemos dejado ninguna moneda sin pesar. Una vez hayamos usado la balanza tres veces, basta con anotar su comportamiento en cada pesaje (**I**, **E** o **D**), con lo que obtendremos una secuencia de tres letras. Esta se corresponderá bien con el anverso o bien con el reverso de alguna de las etiquetas. Bien: la etiqueta que contiene la secuencia de resultados de la balanza es la de la moneda que pesa distinto. Además, si la secuencia figura en el anverso, entonces la moneda en cuestión pesa más que el resto; si la secuencia figura en el reverso, la moneda señalada pesa menos que las demás. En cualquier caso, habremos identificado la moneda y su peso con tan sólo tres usos de la balanza.

¿Cómo podemos convencernos de la efectividad del método? Consideremos qué ocurre, por ejemplo, si la moneda en cuestión pesa más que las demás y es la que tiene escrito **DEI** en el anverso de su etiqueta. Inspeccionando el diagrama, podemos ver que la moneda aparecerá a la derecha en el primer pesaje, lo cual hará que la balanza se incline hacia la derecha (**D**). Como la moneda no se encuentra entre las que pesaremos en el segundo uso, en este caso la balanza quedará en equilibrio (**E**). Finalmente, la moneda aparecerá en el plato izquierdo de la balanza en el tercer pesaje (**I**). Por tanto, obtendremos la secuencia **DEI** como resultado de los tres usos, que es, precisamente, la que figuraba en el anverso de la etiqueta.

¿Qué ocurriría si la misma moneda pesara menos que el resto? En el primer uso, la balanza se inclinaría a la izquierda (**I**), ya que la moneda se halla en el platillo derecho. Como en el segundo pesaje la moneda no se encuentra sobre la balanza, ésta resultaría en equilibrio (**E**). Finalmente, la moneda aparece a la izquierda en el tercer uso, por lo que la balanza se inclinaría a la derecha (**D**). Obtendremos así la secuencia **IED**, que es la que estaba escrita en el reverso de la etiqueta.

El método de Dyson y Lyness no sólo es elegante, sino que admite generalizaciones. Es posible demostrar que bastan n usos de una balanza de platos para identificar a una moneda de peso distinto de entre $(3^n - 3)/2$ monedas. (Con cuatro usos, por ejemplo, podríamos identificar una moneda entre un conjunto de 39 monedas.) El procedimiento es el mismo: asignamos una etiqueta a cada moneda, en cuyo anverso y reverso habremos de escribir la secuencia de resultados de los pesajes en caso de que la moneda pese más o menos que el resto. Finalmente, las instrucciones correspondientes a cada uso de la balanza han de generalizarse así:

En el enésimo pesaje:

- Colocar a la izquierda aquellas monedas cuyas etiquetas tengan una **I** como enésima letra en el anverso.
- Colocar a la derecha aquellas monedas cuyas etiquetas tengan una **D** como enésima letra en el anverso.

Si siente curiosidad por las dos preguntas que mencioné al comienzo del artículo, dos respuestas razonables son "22" y "alrededor de 10.000". A partir de medianoche, el minutero va por delante de la manecilla horaria. Cuando el minutero ha completado toda la circunferencia, el reloj marca la 1:00. Cuando el minutero alcanza a la manecilla horaria, ésta ya ha empezado a desplazarse, por lo que se cruzarán algo más tarde de la 1:05. El segundo cruce ocurre algo después de las 2:10, y el tercero algo más tarde de las 3:15. El undécimo cruce tiene lugar después de las 11:55: a las 12 en punto. Por tanto, las manecillas se cruzan 11 veces durante las primeras 12 horas. Así, al cabo del día, las dos manecillas llegan a cruzarse 22 veces.

No voy a afirmar que sé cuántos afinadores de piano existen en el mundo, pero las fuentes que he consultado estiman que debe haber alrededor de 10.000.

Gabriel Uzquiano es profesor de filosofía en la Universidad de Oxford.

¿Quiere saber más?

La solución de F. J. Dyson y R. C. Lyness apareció en *Mathematical Gazette* en octubre de 1946.

Puede encontrar la lista de preguntas mencionadas en el texto en el blog de Lewis Lin, un consultor de Seattle: **http://blog.seattleinterviewcoach.com/2009/02/140-google-interview-questions.html**

Construcción de un telescopio Dobson

Un astrónomo aficionado nos explica cómo construir, con medios sencillos y baratos, un pequeño telescopio Dobson de unos quince centímetros. Los detalles técnicos pueden encontrarse en la bibliografía y en Internet

Michael Danielides

Nuestro proyecto surgió a propósito de un curso de astronomía en el pequeño pueblo finlandés de Rantsila, cerca de Oulu. Disponíamos de unos prismáticos y de un reflector Vixen de 4,5 pulgadas (11,5 cm) con los que logramos ver el Sol (gracias a un filtro improvisado con una manta isotérmica), la Luna y algunos planetas. Sin embargo, deseábamos utilizar aparatos propios, por lo que acordamos construir un pequeño telescopio de precisión para cada uno y a buen precio.

En primer lugar, había que decidir qué tipo de telescopio se ajustaba mejor a nuestras necesidades y a las particularidades del clima finlandés. Durante el invierno, en el centro del país reinan largas y frías noches de 14 o 16 horas de oscuridad y, en Laponia, más allá del círculo polar, noches polares (de más de 24 horas). Las temperaturas descienden por debajo los 35 ºC bajo cero; en ocasiones, llegan a rozar los –50 ºC, circunstancias poco aptas tanto para el hombre como para los aparatos técnicos: numerosos dispositivos se congelan y, con frecuencia, los componentes electrónicos dejan de operar a temperaturas de –20 ºC.

Así pues, nuestro telescopio debía ser de fácil manejo para un observador embutido en pesada ropa de invierno. En la medida de lo posible evitaríamos los componentes electrónicos; la mecánica del aparato tampoco debía verse alterada por las bajas temperaturas. Naturalmente, el instrumento habría de contar con buenas prestaciones ópticas en relación con su tamaño. Y dado que montar un telescopio en la oscuridad y bajo un frío glacial raramente resulta agradable, el nuestro debía poder transportarse con facilidad. Por todo ello, nos decidimos por la construcción de un mini Dobson.

La duración del curso de astronomía (un total de 24 horas) debía bastar para la fabricación del telescopio de 6 pulgadas (15,25 cm) que teníamos en mente.



▲ **1. El autor junto a uno de los mini Dobson ya concluidos. Este telescopio resulta particularmente apropiado para observaciones en invierno o en climas fríos, carece de componentes electrónicos y puede manejarse con suma facilidad.**



◀ **2. Para construir el tubo del telescopio puede emplearse un tubo de ventilación. Su interior ha de recubrirse con una capa de color negro mate para evitar reflexiones molestas.**



▶ **3. El portaocular de 2 pulgadas se fija al tubo mediante cuatro tornillos. Por motivos de presupuesto, decidimos construir a mano el anillo de adaptación de 2 a 1,5 pulgadas. El portaocular se regula mediante una rosca; un pequeño tornillo permite fijar su posición.**

MICHAEL DANIELIDES/STERNE UND WELTRAUM

En Internet existe un gran número de páginas en las que pueden consultarse las instrucciones para la construcción de un telescopio Dobson. En realidad, sólo se necesitan los espejos, algo de madera, un tubo de ventilación, algunos tornillos, clavos y herramientas comunes.

Aunque es posible tallar los espejos, en nuestro caso ello hubiera requerido largo tiempo, ya que nadie contaba con la experiencia necesaria. En Finlandia, el precio de unos espejos ya acabados (con un espejo principal de 15 cm y una relación focal de *f*/8) ascendía a más de 200 euros. La cantidad resultaba excesiva para la mayoría de los participantes del curso, por lo que consultamos con varias empresas astronómicas de otros países. Muchas prometieron enviar sus ofertas a Finlandia; sin embargo, nunca recibimos nada. Pero el Sr. Birkmaier, de la empresa Intercon Spacetec, mostró desde el comienzo una actitud muy positiva hacia nuestro proyecto. De él adquirimos las partes ópticas por sólo 100 euros por equipo. La misma firma nos proporcionó también portaoculares de 2 pulgadas (5,08 cm) y oculares de 1,25 pulgadas (3,18 cm).

Describimos a continuación la construcción de los elementos principales de nuestro mini Dobson.

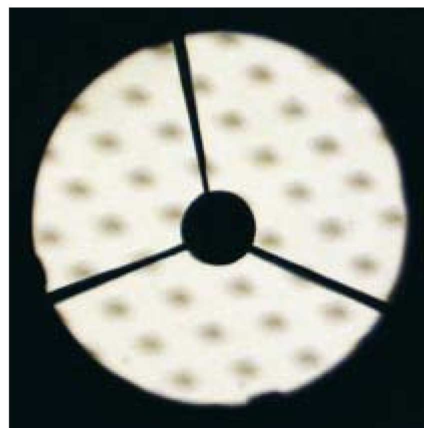
■ **Tubo del telescopio:** La construcción del tubo de un telescopio Dobson admite numerosas variantes. El propio John Dobson recomienda emplear cartón duro, ya que resulta manejable y muy robusto una vez barnizado. En nuestro caso, dado que debíamos observar en condiciones de intemperie adversas, el tubo había de ser muy resistente. Nos decidimos por utilizar tubos metálicos de ventilación, pues son baratos, muy resistentes y aún más fáciles de trabajar. Para versiones más ligeras de telescopios Dobson quizá se prefiera un tubo de rejilla o un simple dispositivo de suspensión para el espejo y el portaocular, si bien tales instrumentos no son tan seguros como el tubo de cartón duro o el tubo de ventilación.

El diámetro del tubo ha de ser unos 5 centímetros mayor que el del espejo principal. Así, para un espejo principal de 15,24 centímetros necesitábamos un tubo de unos 20 centímetros de diámetro. El interior de la mitad superior del tubo (en la que se encuentra el espejo secundario) ha de pintarse de negro mate. En cualquier caso, es aconsejable pintar completamente el interior del tubo para evitar reflexiones molestas.

Un aspecto que reviste gran importancia es la longitud del tubo. Esta viene dada por la distancia focal del espejo principal. John Dobson recomienda relaciones focales *f*/*D* de 6 o 7. Nosotros nos decidimos finalmente por una relación focal de 8. La longitud del tubo ha de ser igual a la distancia focal del espejo principal (longitud del tubo = diámetro del espejo principal × relación focal); así, nuestro espejo de 15 cm requería un tubo de 120 cm. En lo tocante a las dimensiones de los espejos, el que desee comparar sus cálculos con los del comerciante debe tener en cuenta la siguiente fórmula. El diámetro *d* del espejo secundario viene dado por:

$$d = d_f + L(D - d_f)/f,$$

▼ **4. Una mirada a través del portaocular (sin ocular ni anillo de adaptación) ilustra el ajuste del espejo principal. Se percibe claramente la imagen de la araña centrada en el espejo principal, con el espejo secundario situado también en el centro. Los puntos se deben a una tapa situada en el extremo del tubo, ya que, con el fin de evitar daños en la vista, es absolutamente necesario evitar cualquier iluminación directa del espejo.**



donde *D* es el diámetro del espejo principal, *f* designa la distancia focal y *L* la distancia entre el espejo secundario y el punto focal del ocular. El parámetro d_f se calcula según:

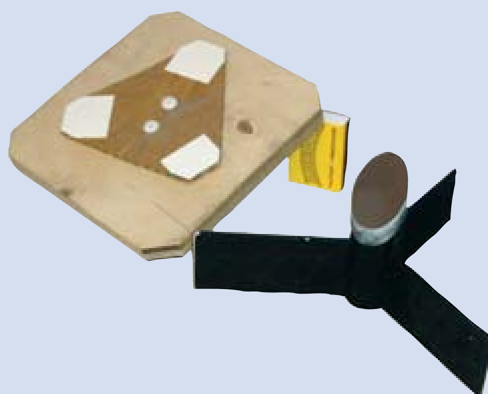
$$d_f = fx/57{,}3,$$

donde *x* es el valor en grados del campo de visión cuando éste se halla completamente iluminado (pueden elegirse valores entre 0,25° y 0,5°; el primero ofrece mayor contraste en cuerpos celestes como los planetas). El factor de 57,3 se incluye para transformar los grados



◀ 5. Dos participantes del curso terminan de pulir los brazos de la araña de sujeción del espejo secundario.





▶ 6. A la izquierda apreciamos el soporte del espejo según las instrucciones originales de John Dobson. A la derecha, la araña de madera con el espejo secundario. Todas las partes de madera se han pintado de negro para evitar reflexiones molestas.

▲ 7. La montura azimutal de madera consta de una tabla sobre la que una caja cuadrada (montada sobre placas de teflón y un disco) puede girar alrededor de un eje vertical fijo (no visible aquí). El tubo puede girar en torno a un eje horizontal gracias a un soporte que, con dos ruedas, se apoya sobre la caja. Las ruedas descansan sobre pequeñas placas de teflón.

en radianes. La distancia *L* entre el espejo secundario y el punto focal del ocular se calcula como la suma del radio del tubo y la altura del portaocular.

■ **Portaocular:** El portaocular puede fabricarse con un pequeño rollo de papel duro, el cual se sujeta al tubo del telescopio para proporcionar al ocular un soporte adecuado. Con todo, nosotros decidimos adquirir uno de 2 pulgadas (2,54 cm) ya acabado (los precios oscilan entre los 50 y los 100 euros), aunque sin el anillo de adaptación de 2 a 1,25 pulgadas (el tamaño del ocular). En su lugar, empleamos un anillo de plástico duro fabricado por nosotros mismos con ayuda de un torno.

■ **Soporte para el espejo principal:** La construcción del soporte para el espejo principal y la araña de sujeción del espejo secundario es muy sencilla y se encuentra ampliamente documentada en la Red. Es fundamental mencionar que, al trabajar con el espejo principal, ha de evitarse la reflexión de la luz solar o la de cualquier lámpara potente, ya que podría ocasionar lesiones permanentes en la vista. Una vez finalizado el montaje del tubo y los espejos habremos superado la parte más difícil del proyecto.

■ **Montura de madera:** La montura de madera se construye con láminas de madera prensada. En la Red pueden encontrarse plantillas listas para este fin. Es importante emplear placas de teflón para las ruedas laterales y la placa base, ya que este material presenta un coeficiente de rozamiento mínimo. Desafortunadamente, no siempre resulta fácil de conseguir.

■ **Tareas de ajuste:** Tras finalizar la montura, el tubo debe colocarse de tal manera que se halle en equilibrio cualquiera que sea su posición. Si no se consigue por completo, suele ayudar ajustar las ruedas contra el dispositivo de sujeción.

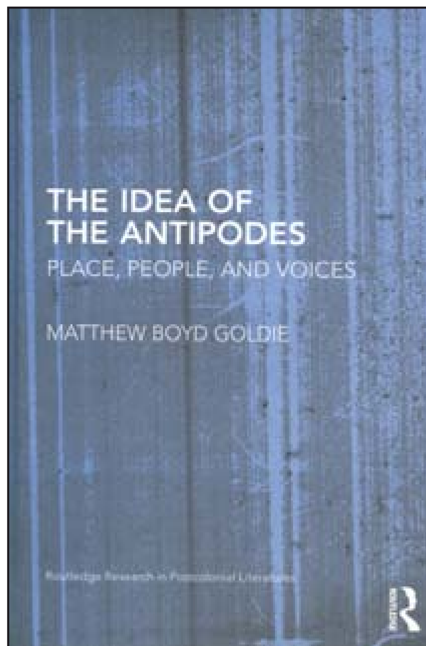
■ **Alineación del espejo principal:** Se trata del último paso. Esta tarea entraña bastante dificultad para una sola persona, por lo que es muy recomendable contar con ayuda. (Aquí, como en toda manipulación con los espejos, para evitar lesiones en la vista es muy importante no orientar el tubo hacia una fuente luminosa potente.) Sin ocular, una persona observa a través del portaocular la imagen de la araña de sujeción del espejo secundario. Una segunda persona mueve el tornillo de ajuste situado en el soporte del espejo principal hasta que la imagen de la araña quede exactamente centrada en dicho espejo. Una vez conseguido, ya podemos prepararnos para disfrutar de lo que los astrónomos llaman "la primera luz".

Con entusiasmo, no hacen falta conocimientos previos para construir un mini Dobson e introducirse con él en el fascinante mundo de la astronomía. No existen alternativas comerciales a un mini Dobson. Sólo a partir de un diámetro del espejo superior a las diez pulgadas (25,4 cm) comienza a ser cuestionable lo económico del proyecto en comparación con el precio de un instrumento ya acabado.

Más información

Puede encontrar información y enlaces sobre la construcción de un telescopio Dobson en la página de la asociación *Sidewalk Astronomers*, fundada por el propio John Dobson: **http://www.sfsidewalkastronomers.org/**

MICHAEL DANIELIDES/STERNE UND WELTRAUM



THE IDEA OF THE ANTIPODES. PLACE, PEOPLE, AND VOICES,
por Matthew Boyd Goldie. Routledge Research in Postcolonial Literatures; Nueva York y Londres, 2010.

Al otro lado

Geografía, antropología e historia de lo lejano

Hubo un tiempo en que las ciencias sociales, sobre todo la historia, abandonaron el lenguaje narrativo para adoptar el lenguaje de las ciencias experimentales. Predominaron entonces la historia socioeconómica de los métodos cuantitativos y estadísticos, el estructuralismo braudeliano fundamentado en la geografía y geología "de larga duración", y la historia marxista-economicista. Cualquier investigación debía estar aprisionada en tres coordenadas (un lugar, un período y una materia) para constituirse en una monografía de carácter científico.

Este *paradigma* de las ciencias sociales, siguiendo la terminología que generalizó Thomas Kuhn en su estudio sobre la estructura de las revoluciones científicas, se fue transformando paulatinamente durante los años setenta y ochenta. Los estudios culturales, más inclinados a la antropología, la lingüística y la etnografía que a la sociología y la economía, empezaron a ser hegemónicos. Los estudios transversales fueron sustituyendo a los monográficos, y se tendió a buscar temas universales y globales, verificados a lo largo de toda la historia, más que unitarios y locales.

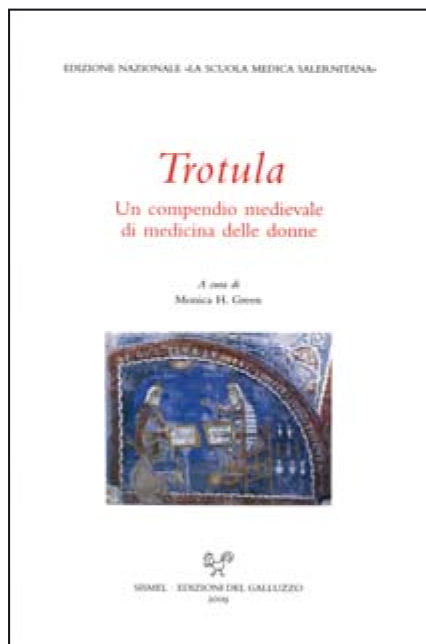
Esta tendencia se avenía perfectamente a la demanda de una sociedad que había superado la guerra fría y sus contiendas ideológicas, y había entrado en el torbellino de las desavenencias religiosas, étnicas y culturales. Y también se adecuaba a un mundo globalizado donde las fronteras regionales, nacionales y estatales eran más borrosas.

El fascinante libro de Boyd sobre la evolución histórica de la idea de las antípodas responde perfectamente a estas coordenadas. La aproximación cultural que el autor realiza de las antípodas supera ampliamente, sin renunciar a ella, la definición estrictamente geográfica del concepto. La clave de la argumentación de Boyd es que la idea de las antípodas ha ido variando a lo largo de la historia, y refleja adecuadamente la articulación "centro-periferia", que antropólogos y sociólogos como Edward Shils y Clifford Geertz nos han enseñado a modo de clave para entender las convergencias de la cultura, la sociedad y la política.

Aunque a veces lastrado por su lenguaje algo farragoso, Boyd realiza un seductor recorrido por la historia del concepto, utilizando la teoría crítica para trazar las múltiples visiones que ha habido sobre la idea de las antípodas. El mundo clásico fue el primero en descubrir el sentido relativo del concepto de antípodas, no estrictamente restringido a la idea de los opuestos geográficos. El mundo medieval tendió a mitificar el concepto, contando historias de travesías a lugares opuestos en el globo, que incluían viajes intraterrenos a través de túneles imaginarios. La modernidad empezó a construir una visión de las antípodas centrada en la idea del Centro constituido por "Occidente" y "Norte", y una periferia "colonizable", asociada a las categorías de "Oriente" y "Sur". Boyd dedica sus conclusiones a analizar el presente y el futuro de la idea de las antípodas, muy condicionada lógicamente por la globalización actual y la posibilidad de las comunicaciones instantáneas y los mestizajes culturales. En este recorrido histórico, Boyd utiliza las más diversas fuentes, aparte de las estrictamente literarias, acudiendo a improntas iconográficas, cartográficas y científicas.

Es una magnífica noticia que un profesor de literatura acometa un tema de tanta repercusión científica, sin perder por ello el método propio de las ciencias humanas. Paradójicamente, los acercamientos culturales y transversales de la realidad pueden relacionar las ciencias humanas y las experimentales con mayor eficacia que aquellos que buscaron unos maridajes artificiales entre los respectivos lenguajes (narrativos y científicos), que es preferible respetar en sus correspondientes ámbitos. En este sentido, sería deseable que la "historia de la ciencia" —una subdisciplina clave, desgraciadamente con todavía escasa repercusión académica en nuestro país— dejara de ser un campo acotado y cuarteado a los respectivos departamentos científicos, y se asentara también en los humanísticos y sociales. El itinerario escogido por Boyd, tanto en la elección de su tema como en su procedimiento y resolución, traza un camino audaz pero tremendamente eficaz en esta dirección.

Jaume Aurell Cardona



TROTULA. UN COMPENDIO MEDIEVALE DI MEDICINA DELLE DONNE.

Dirigido por Monica H. Green. Sismel. Edizione del Galluzzo; Florencia, 2009.

Ginecología

Medicina medieval para las mujeres

Desde los albores del siglo XII la ciudad de Salerno, en el sur de Italia, adquirió fama en toda Europa como lugar donde se formaban y ejercían los mejores médicos del momento. Es así como se inicia la tradición que remite a la Escuela de Salerno, una comunidad informal de maestros y discípulos, en la que se desarrollaron instrumentos de instrucción y de investigación que influirían de manera decisiva en la evolución de la medicina occidental.

Un hecho decisivo en el despertar de la medicina salernitana fue la llegada a la ciudad, en torno a 1070, de un mercader oriundo del norte de Africa llamado Constantino, bien provisto de libros árabes de medicina. A partir del comentario de esas obras y de otras de Galeno y de Hipócrates se pondrá a punto la metodología que dará paso a la medicina universitaria.

Sin embargo, nuestro conocimiento acerca de la medicina salernitana ha variado desde los estudios de Salvatore De Renzi en los años centrales del siglo XIX. Por una parte, se ha visto que autores y escritos considerados salernitanos pertenecen a otros ámbitos geográficos (Montpellier, París y Bolonia, entre otros). Por otra, las ediciones de De Renzi no se basan en los manuscritos más antiguos ni en los más completos.

Es por eso por lo que se realizan nuevas versiones que muestran con mayor exactitud la primera literatura médica medieval europea, algo que la profesora Mónica Green lleva a cabo de manera excelente con el escrito ginecológico salernitano, cuya versión inglesa es del año 2001.

La edición crítica del tratado de ginecología *Trotula* no ha sido empresa fácil, debido a la existencia de un gran número de manuscritos, copiados desde el siglo XIII al XV, sin contar las ediciones renacentistas que contienen la obra. Pero ha valido la pena desentrañar el origen y conocer la historia del texto.

Se pensaba que el tratado había sido redactado por una médico salernitana de nombre Trota. El trabajo de la profesora Green muestra que el escrito circuló durante los años centrales del siglo XII en forma de tres libros independientes, denominados: “Enfermedades de las mujeres”, “Tratamientos de las mujeres” y “Cosmética de las mujeres”; en torno a 1200 se fundieron para dar lugar a una redacción que en los siglos sucesivos iría puliendo los contenidos y añadiendo nuevos remedios y observaciones, hasta llegar a la versión estandarizada publicada en el Renacimiento, que constituye el modelo de esta edición.

De los tres libros, el primero (“Enfermedades de las mujeres”) está redactado en un lenguaje experto. Es el que aporta los contenidos teóricos. Es también el más extenso. El autor anónimo utilizó amplios párrafos de los libros árabes: el *Viaticum*, de Ibn al Jazzar (ca. 898-980), traducido por Constantino el Africano, y el *Liber ad Almansorem*, del persa Rhazes (ca. 854-925), traducido en España por Gerardo de Cremona. A ellos hay que sumar recetas que proceden de un texto ginecológico hipocrático que circuló en latín durante la Alta Edad Media.

El segundo libro (“Tratamiento de las mujeres”) es el de extracción más empírica. No se observan en él razonamientos teóricos y las recetas que contiene están lejos del estilo libresco del primer libro, lo que muestra una actitud más pragmática. Es aquí donde hallamos un amplio fragmento procedente de la *Medicina practica secundum Trota*, atribución que se extenderá a toda la compilación.

Por último, la “Cosmética de las mujeres” es el libro que posee mayor sabor local, pues los productos empleados para embellecer los cabellos y la piel pertenecen a la cultura mediterránea.

La edición crítica de Green ofrece enfrentadas la versión latina con la traducción italiana y se acompaña de un glosario terapéutico, notas a la edición latina, bibliografía y un útil índice de términos, sobre todo de carácter botánico, que permite identificar las plantas utilizadas.

Será una obra bien apreciada por los interesados en la historia de las mujeres y en la historia de la ciencia medieval.

Pedro Gil Sotres

EN EL PROXIMO NUMERO DE AGOSTO 2010

¿Es el tiempo una ilusión?,

por Craig Callender

Los conceptos de tiempo y cambio pueden surgir de un universo que sea, en su raíz, completamente estático.

Fuego y evolución en el Mediterráneo,

por Juli G. Pausas

El fuego y los incendios forestales han existido siempre en la historia de la vida terrestre. Un gran número de especies vegetales han adquirido características que les confieren resistencia a los incendios recurrentes.





Doce acontecimientos cruciales,

por VV. AA.

Clonación humana, guerra nuclear, vida sintética, superconducción a temperatura ambiente, máquinas conscientes, fusión de los casquetes polares, pandemias mortíferas y otros fenómenos que podrían transformar el mundo.

El ingrediente secreto de la Tierra,

por Kei Hirose

El descubrimiento de un nuevo mineral de alta densidad revela que el manto terrestre es una región más activa de lo que se pensaba y arroja luz sobre la historia del planeta.

Origen y desarrollo de la cartografía lunar,

por Manfred Gottwald

Los años 1609 y 1969 marcan el inicio y fin de una era de varios siglos, en la que los astrónomos descubrieron la cara de la Luna con creciente precisión. Abarca desde Galileo Galilei, con sus primeras observaciones telescópicas, hasta los alunizajes tripulados del programa Apollo.

